

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

Ю. И. ВИТИНСКИЙ



Ю. И. ВИТИНСКИЙ

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1983

22.652

В 54

УДК 523.74

Витинский Ю. И.

В54 Солнечная активность. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1983. — 192 с. с илл.

В книге в доступной форме рассказывается об активных процессах, происходящих на поверхности Солнца, — о солнечной активности. Описаны важнейшие особенности активных образований (солнечных пятен, вспышек, протуберанцев и т. д.) и их эволюция. Особое внимание уделено циклам солнечной активности и гипотезам об их происхождении. Дается представление о работе службы Солнца, о международных предприятиях по изучению солнечной активности и о ее прогнозировании.

Для широкого круга читателей, обладающих подготовкой в объеме средней школы и интересующихся проблемами современной астрофизики.

В 1705040000—167
053(02)-83 163-83

ББК 22.652
526

Юрий Иванович Витинский

Солнечная активность

Редактор *И. Е. Рахлин*

Техн. редактор *И. Ш. Аксельрод*

Корректор *Е. А. Белицкая*

ИБ № 12108

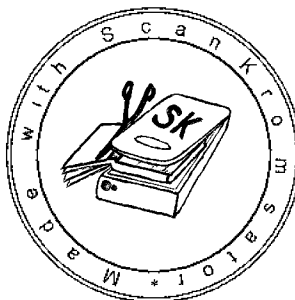
Сдано в набор 11.01.83. Подписано к печати 05.11.83. Т-19291. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 1. Литературная гарнитура. Высокая печать. Условн. печ. л. 10,08. Усл. кр.-отт. 10,48. Уч.-изд. л. 10,53. Тираж 80 000 экз. Заказ № 499. Цена 35 коп.

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгения Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 198052, г. Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29.

В 1705040000—167
053(02)-83 163-83



© Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1983, с изменениями.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава 1. Солнце — наша звезда	7
1. Зачем изучают Солнце?	7
2. Основные характеристики Солнца	9
3. Строение Солнца	11
4. Магнитные поля и движения солнечной плазмы	16
5. Солнце и Земля	19
Глава 2. Что такое солнечная активность?	21
1. Солнце спокойное и активное	21
2. Солнечные пятна	23
3. Факельные площадки	29
4. Солнечные вспышки	34
5. Протуберанцы	41
6. Корональные конденсации	46
7. Магнитные области	49
8. Корональные дыры	52
Глава 3. Активные области	54
1. Понятие активной области	54
2. Рождение активных областей	55
3. Типичная эволюция активной области	57
4. Типы активных областей и их вспышечная активность	61
5. О физической природе развития активной области	65
Глава 4. Цикличность солнечной активности	71
1. Индексы солнечной активности	71
2. 11-летний цикл солнечной активности	78
3. 22-летний цикл солнечной активности	91
4. Длинные циклы солнечной активности	95
5. Флуктуации солнечной активности	101
6. Маундеровский и прочие длительные минимумы	105
7. Существует ли иерархия солнечных циклов?	109
Глава 5. Активные долготы	112
1. Понятие активной долготы	112
2. Основные особенности активных долгот	114
3. Активные долготы и магнитные поля	121
4. Активные долготы и солнечные циклы	125

5. Активные долготы и секторная структура межпланетного магнитного поля	127
Глава 6. Гипотезы о происхождении солнечной активности . .	130
1. Три типа гипотез о солнечной активности	130
2. Динамо-теория солнечных циклов	135
3. Теория на распутье	144
Глава 7. Служба Солнца	148
1. Международная и советская службы Солнца	148
2. Международные предприятия по изучению солнечной активности (МГГ, МГС, МГСС, ГСМ)	156
3. Прогнозы солнечной активности	161
Глава 8. Солнечно-земные связи	167
1. Общие соображения о солнечно-земных связях	167
2. Солнечная активность и верхняя атмосфера	169
3. Солнечная активность и тропосфера	176
4. Солнечная активность и биосфера	179
Заключение	181

ПРЕДИСЛОВИЕ

Со времени выхода в свет первого издания этой книги в серии «Популярные лекции по астрономии» прошло уже более десяти лет. За это время наши представления о солнечной активности претерпели значительные изменения, которые обязаны прежде всего новым данным о Солнце, полученным благодаря развитию техники.

Если в конце 60-х годов изучение Солнца опиралось в основном на наземные наблюдения в видимой области спектра и в радиодиапазоне, а результаты космических исследований носили ограниченный, обрывочный характер, то теперь положение резко изменилось. Работа пилотируемых орбитальных космических станций, специализированных искусственных спутников Земли и автоматических космических аппаратов, на которых были установлены приборы с исключительно высоким пространственным и временным разрешением, позволила регистрировать явления солнечной активности за достаточно длинные интервалы времени в областях спектра, недоступных наблюдателю с поверхности Земли. Это прежде всего далекое ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучения Солнца. Кроме того, новые сведения о солнечной активности были получены на советской стратосферной автоматической солнечной обсерватории в 1970 и 1973 годах.

С другой стороны, значительные изменения произошли и в технике наземных наблюдений солнечной атмосферы, особенно магнитных полей и движений в ней. И хотя процесс этого усовершенствования еще далек от завершения, он уже дал столь много для понимания природы солнечного магнетизма, что во многих вопросах исследователи нашего дневного светила вынуждены были по-иному взглянуть на солнечную активность.

Существенный прогресс в получении из наблюдений Солнца новых сведений об активных процессах, происходящих в солнечной атмосфере, побудил теоретиков глубже проникнуть в сущность не только отдельных явлений солнечной активности, особенно солнечных пятен и солнечных вспышек, но и всей своеобразной переменности нашей звезды. Итоги этой большой работы были подведены на симпозиуме Международного астрономического союза «Основные механизмы солнечной активности» в Праге в 1975 году, который послужил новым толчком для изучения Солнца как теоретиками, так и наблюдателями. Пока еще рано говорить о каких-то итогах этих исследований, но нельзя не остановиться на тех вопросах, которые они поставили.

Учитывая все сказанное здесь, возникла необходимость существенной переработки книги с дополнением ее новыми данными, которые были получены за последние 10—15 лет.

Более того, хотя основным предметом этой книги является солнечная активность, было бы неправильно не дать читателю хотя бы самого общего представления о ее воздействиях на Землю. Эта область науки развивается очень быстро, тем более что она имеет непосредственное практическое значение. И тем не менее автор надеется, что и эта заключительная часть книги может оказаться полезной.

Автор искренне признателен тем, кто в той или иной мере содействовал появлению нового издания этой книги, и в первую очередь Г. Ф. Вяльшину, взявшему на себя труд полностью ознакомиться с текстом рукописи, В. И. Магарову, предоставившему свои прекрасные снимки для иллюстративного материала книги, Э. В. Кононовичу, доброжелательная критика которого содействовала более ясному изложению ряда вопросов, Р. Н. Ихсанову, А. И. Олю и Б. М. Рубашеву за ценные советы по отдельным проблемам, Е. В. Воронец и Е. Л. Терехиной за большую техническую помощь в оформлении рукописи.

22 августа 1982 г.

Глава 1

СОЛНЦЕ — НАША ЗВЕЗДА

1. Зачем изучают Солнце?

Солнце — одна из самых заурядных звезд. Она не выделяется ничем особенным среди бесчисленного множества своих сестер во Вселенной. Желтая звезда небольшого размера с весьма медленным вращением и весьма скромной температурой поверхностных слоев — таково наше Солнце. Угнаться ли ему за голубыми звездами-гигантами, температура которых достигает 20 тысяч градусов? Сравниться ли ему со звездами, которые настолько быстро вращаются вокруг своей оси, что экваториальные точки их поверхности движутся с огромной скоростью 200 км/с и более? И, кроме всего прочего, Солнце — типичная спокойная звезда. Оно не испытывает значительных колебаний блеска и радиуса даже за большие промежутки времени, не говоря уже о коротких, которые столь характерны для переменных звезд.

Давно канули в вечность времена, когда человек испытывал перед Солнцем суеверный страх и поклонялся ему как высшему божеству, которое способно либо дарить ему блага, либо приносить горести и страдания. Почему же интерес к нему, сначала носивший чисто утилитарный характер, не только не ослабел, но в наши дни даже усилился? Не слишком ли много чести для такой обыкновенной, бесцветной (в житейском смысле слова) звезды?

Попробуем разобраться в этом вопросе, взглянув на Солнце глазами сначала астронома, затем физика и, наконец, просто обитателя Земли.

Для астронома Солнце — прежде всего ближайшая звезда. Только восемь с небольшим минут требуется, чтобы солнечные лучи достигли земной поверхности, тогда как от самой близкой к нам звезды Проксимы Центавра свет идет 4,3 года. Вследствие такой исклю-

чительной близости Солнца к Земле оно является единственной звездой, которую мы видим не как точку, а как диск и поэтому можем изучать наиболее детально. С Солнцем были связаны самые первые шаги астрономов, направленные на обеспечение первостепенных житейских потребностей. Как наше дневное светило, Солнце помогало им отсчитывать время и ориентироваться в пространстве. В дальнейшем роль его еще более повысилась, когда Николай Коперник доказал, что оно является центром нашей планетной системы. Появление астрофизических методов исследования небесных тел превратило Солнце в своеобразную модель типичных спокойных звезд. Оно впервые позволило нам узнать о таких свойствах звезд, о которых раньше и не подозревали, например, об их магнитном поле, звездном ветре и других загадочных явлениях. Его изучение способствовало лучшему пониманию нашего места во Вселенной.

Физик рассматривает Солнце как своеобразную физическую лабораторию, в которой происходят процессы несравненно большего масштаба, чем привычные, а иногда и вовсе неизвестные на Земле. Чтобы лучше представить себе роль Солнца в развитии физики, достаточно вспомнить, что магнитная гидродинамика, изучающая поведение плазмы в магнитном поле, была порождена результатами исследования солнечных магнитных полей. Еще раньше изучение движений на Солнце способствовало прогрессу гидродинамики. А ныне наше дневное светило торопит физиков скорее решить вопрос, существует ли масса покоя неуловимого солнечного нейтрино, чтобы раскрыть наконец загадки недр Солнца, а заодно и всей Вселенной.

Поскольку Солнце — наша звезда, она отнюдь не безразлична для любого обитателя Земли. Дело в том, что оно не только определяет физические условия на Земле и на других планетах, неся нам свет и тепло, не только в конечном итоге способствовало появлению всего живого на Земле, в том числе и человека, Солнце всегда вмешивалось и вмешивается в нашу жизнь. Сейчас мы еще не вполне представляем себе широту этого «вмешательства». Но зато известно, что если раньше изучением нашего дневного светила занимались лишь астрономы и в какой-то мере магнитологи и радиофизики, то теперь оно занимает ученых многих специальностей и круг их все еще продолжает расширяться.

Итак, надеюсь, читатель мог убедиться, что неослабевающий интерес к изучению Солнца вполне закономерен, так как через Солнце лежит наш путь к познанию не только бескрайних просторов Вселенной, но и всего того, что окружает нас на Земле.

2. Основные характеристики Солнца

Солнце служит характерным представителем звезд, находящихся на устойчивой стадии своей эволюции. Его возраст составляет примерно 5 миллиардов лет. Оно расположено вблизи центральной плоскости нашей Галактики на расстоянии нескольких десятков килопарсеков ($1 \text{ кпс} = 3,1 \cdot 10^{21} \text{ см}$) от ее ядра на внутреннем краю одной из ее спиральных ветвей и движется по отношению к ближайшим звездам со скоростью 19,7 км/с. Таким образом, если для нас Солнце — центральное светило, то в действительности (даже в масштабах Галактики) оно находится «на задворках Вселенной».

Прежде чем в полной мере осмыслить все то, что удалось к настоящему времени узнать о Солнце, но что пока далеко не всегда поддается нашему пониманию, займемся такими его характеристиками, которые определены достаточно надежно и даже включены в систему астрономических постоянных, т. е. фундамент современной астрономии.

На основании наиболее точных радиолокационных измерений расстояния от Земли до Венеры среднее расстояние Земли от Солнца составляет 149 600 000 км. Обычно эту величину называют астрономической единицей (а. е.).

Средний угловой диаметр солнечного диска, видимого на Земле, равен $31'59''$. Если учесть расстояние Солнца до Земли, то линейный радиус Солнца составляет 695 990 км, т. е. примерно в 109 раз больше радиуса нашей планеты. Таким образом, одной угловой секунде на солнечной поверхности соответствует 725 км. Заметим, что обнаружить детали такого размера при наземных наблюдениях даже на наиболее благоприятно расположенных (в отношении астроклимата) обсерваториях можно лишь в редких случаях. Чаше же таким пределом служат $2''$, т. е. 1450 км на поверхности Солнца.

Масса Солнца, которую часто используют в качестве единицы массы звезд, составляет $2 \cdot 10^{33}$ г, т. е. она в 333 000 раз больше массы Земли. Определяя по радиусу Солнца его объем, находим, что средняя его плотность равна $1,409 \text{ г/см}^3$. Это примерно в 3,9 раза меньше средней плотности нашей планеты. Но средние значения иногда могут ввести в заблуждение. Действительно, если принять во внимание, что до расстояния от центра 0,8 радиуса Солнце содержит около 99% своей массы, станет ясным, что вблизи видимой солнечной поверхности плотность примерно в 70 тыс. раз меньше ее средней величины. Ускорение силы тяжести на поверхности Солнца равно $27\,998 \text{ см/с}^2$, что почти в 28 раз больше земного. Критическая скорость, превышение которой позволяет покинуть Солнце, составляет $617,7 \text{ км/с}$ ($11,19 \text{ км/с}$ для Земли).

По движению деталей, видимых на солнечном диске, например, солнечных пятен, установлено, что наше дневное светило вращается вокруг своей оси в том же направлении, что и Земля и большинство планет, причем экватор Солнца наклонен к земному экватору под углом до $26^\circ,4$ и к плоскости земной орбиты (эклиптике) — под углом до $7^\circ,2$. Вращение это очень медленное. За одни земные сутки точки солнечной поверхности на экваторе, согласно результатам наблюдений солнечных пятен, перемещаются в среднем на $14^\circ,38$. Эта величина соответствует сидерическому периоду вращения звезды около 25 суток. Вследствие движения Земли вокруг Солнца земному наблюдателю такой период представляется несколько бóльшим. Этот синодический период вращения Солнца близок к 27 суткам. Линейная скорость движения экваториальной точки солнечной поверхности равна примерно 2 км/с . Угловая скорость вращения видимой поверхности, а возможно, и других слоев солнечной атмосферы, убывает с удалением от экватора примерно пропорционально квадрату синуса гелиографической широты. Такое вращение, обычно присущее жидким и газовым средам, называется дифференциальным, в отличие от жесткого, или твердого.

Количество энергии, излучаемое Солнцем за 1 секунду, т. е. его светимость, обычно определяют по величине солнечной постоянной — количеству солнечной энергии, проходящему за 1 минуту через перпендику-

лярную к его лучам площадку в 1 см^2 , которая расположена на среднем расстоянии от Солнца до Земли и вне земной атмосферы. Согласно измерениям, осуществленным с ракет и на высокогорных обсерваториях, ее значение равно $1,95 \text{ кал/см}^2 \text{ мин}$. Это дает для величины светимости Солнца $3,8 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}$ и потока излучения с солнечной поверхности $6,28 \cdot 10^{10} \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{с}$. Эффективная температура поверхности нашего дневного светила равна 5770 К .

Химический состав Солнца выводят из данных наблюдений солнечной атмосферы, предполагая, что в начале эволюции нашей звезды он был таким же и в недоступных для нас ее недрах. По современным представлениям 71% его массы составляет водород, $26,5\%$ — гелий и $2,5\%$ — другие элементы. Таким образом, Солнце представляет собой в основном водородную звезду. Помимо нейтральных, в нем имеется примерно равное количество положительно и отрицательно заряженных частиц. Такое состояние вещества называется плазмой. Поэтому правильнее было бы сказать, что Солнце является не просто газовым, а плазменным шаром.

Но солнечная плазма находится в своеобразных условиях, поскольку Солнце обладает магнитным полем. Вблизи полюсов оно имеет напряженность $1\text{—}2 \text{ Гс}$, которая соответствует магнитному потоку $8 \cdot 10^{21} \text{ Мкс}$. Структура этого поля очень сложная. Поэтому эти цифры по своей надежности значительно уступают приведенным выше.

3. Строение Солнца

Как известно, все регистрируемые нами ныне виды солнечного излучения, от гамма-лучей до радиоизлучения, не позволяют зондировать недра Солнца. Единственное средство для этого — поймать солнечные нейтрино, — пока дало результаты, весьма далекие от обнадеживающих. Во всяком случае они не могут служить основанием для того, чтобы отказаться от принятых в настоящее время суждений о внутреннем строении Солнца. Но важно отдавать себе отчет в том, что все эти представления базируются только на данных наблюдений солнечной атмосферы и применении законов физики.

Здесь мы не станем заниматься рассмотрением того, как были выведены основные физические характеристики

центральной части Солнца, или ядра, а ограничимся только перечислением главных результатов этого изучения. Было установлено, что температура в центре нашего дневного светила равна 15 млн. К, плотность — 160 г/см^3 , давление $3,4 \cdot 10^{17} \text{ дин/см}^2$. Хотя ядра атомов здесь «упакованы» примерно в 1000 раз плотнее, чем в металлах, высокая температура поддерживает вещество в газообразном состоянии. Такие физические условия обеспечивают освобождение энергии, генерируемой в недрах Солнца в результате образования ядер гелия из ядер водорода. Эта энергия переносится к солнечной поверхности в виде излучения. Такой перенос сопровождается быстрым уменьшением наружу температуры, давления и плотности, а вместе с тем и средней энергии фотонов, которые на своем пути поглощаются и переизлучаются много раз. В результате гамма-лучи последовательно превращаются в рентгеновское, а затем в ультрафиолетовое излучение и, наконец, в видимый свет, который наиболее обильно излучается в пространство.

Однако на глубине примерно 100—200 тыс. км от поверхности Солнца такой способ передачи энергии становится неэффективным. Здесь температура уже невелика по сравнению с температурой ядра. Поэтому ионизация водорода уменьшается. Вместе с тем возрастание числа атомов увеличивает поглощательную способность газа, что приводит к возрастанию градиента температуры. В результате при создавшихся условиях энергия переносится преимущественно самим веществом, сосредоточенным в более горячих по сравнению с окружающей средой элементах. Такой способ передачи энергии называется конвективным переносом, а слой, в котором он действует, — конвективной зоной.

Существуют многочисленные модели конвективной зоны Солнца. Все они опираются на различные (нередко полукачественные) теории конвекции и дают весьма противоречивые данные, которые трудно связать с соответствующими параметрами более глубоких слоев и фотосферы Солнца. Поэтому не будем заниматься их разбором в надежде на появление в недалеком будущем большей ясности в этом вопросе. Но при всей скудости нынешних знаний о конвективной зоне уже сейчас исследователи Солнца отчетливо представляют себе, что она играет для Солнца исключительную роль

уже хотя бы потому, что служит колыбелью разнообразных видов движения и магнитных полей, которые мы имеем возможность наблюдать в солнечной атмосфере.

Наиболее легко доступна наблюдениям самая нижняя часть атмосферы Солнца — фотосфера. Ее можно видеть даже невооруженным глазом через зачерненное стекло (необходимое, чтобы яркий солнечный свет не повредил зрения). Толщина фотосферы очень невелика: она не превышает нескольких сотен километров. Зато из нее выходит большая часть излучаемой Солнцем энергии с максимумом в видимой области спектра. Поэтому иногда ее называют видимой поверхностью Солнца. Но вряд ли такое название, нередко заменяемое в популярных брошюрах словами «солнечная поверхность», можно считать оправданным. Ведь фотосфера — довольно протяженный слой, который беспрепятственно пропускает свет в лежащие выше прозрачные слои атмосферы и создает резко очерченный край солнечного диска.

Через фотосферу энергия переносится, как и в недрах Солнца, преимущественно излучением и частично звуковыми волнами. Температура фотосферы составляет в среднем примерно 6000 К. Она убывает по направлению к лежащим выше слоям солнечной атмосферы, достигая минимального значения в слое так называемого температурного минимума. Фотосфера отличается очень большой непрозрачностью. Она является единственной на Солнце областью нейтрального водорода. Благодаря соединению с его атомами свободных электронов, возникших в основном в результате полной ионизации металлов, в фотосфере образуются отрицательные ионы водорода. Это протоны, с которыми связаны не один, а два электрона. Именно отрицательные ионы водорода прежде всего служат причиной столь сильного поглощения фотосферным веществом излучения в видимой области спектра.

Солнечная фотосфера имеет тонкую структуру. Как стало ясно в результате стратосферных наблюдений, она состоит из светлых пятнышек довольно неправильной формы (гранул), разделенных более узкими темными межгранульными промежутками. Размеры гранул колеблются от 150 до 1500 км. Температура их на несколько сотен градусов выше, чем в соседних темных

участках, которые отличаются большей устойчивостью. Фотосферная грануляция характеризуется преимущественно вертикальными движениями со скоростями 1—2 км/с и, как сейчас считают, является порождением конвективной зоны и возникших в ней волновых движений. Как мы увидим дальше, большую роль в ней играют магнитные поля.

Более высокие слои атмосферы Солнца недоступны для наблюдений в обычном белом свете, поскольку они очень разрежены и излучают только в отдельных спектральных линиях. Всего каких-нибудь сто лет назад об их существовании знали только благодаря наблюдениям полных солнечных затмений. В те немногие минуты, когда Луна закрывала солнечный диск, можно было видеть окаймляющее его узкое розоватое кольцо, вид которого напоминает огненную прерию. Это солнечная хромосфера — довольно протяженный слой атмосферы Солнца, простирающийся на тысячи километров над уровнем фотосферы. Она светится преимущественно в ярких линиях водорода, ионизованного кальция и гелия. Со временем астрономы создали специальные приборы, позволяющие «вырезать» из белого света свет этих линий, и таким образом получили возможность наблюдать солнечную хромосферу в любой погожий день вне затмения Солнца. Это произошло еще в прошлом столетии.

Солнечная хромосфера излучает не только в видимом, но и в ультрафиолетовом и отчасти рентгеновском диапазонах спектра, а также в радиодиапазоне с длиной волны меньше 15 см. Пожалуй, самое поразительное ее свойство состоит в том, что при дальнейшем убывании с высотой плотности и давления температура в ней не уменьшается, а возрастает от нескольких тысяч до нескольких сотен тысяч градусов. Такое резкое повышение температуры, согласно современным представлениям, обусловлено волнами, возникшими еще в конвективной зоне и проникающими через толщу фотосферы и хромосферы, которые несут достаточно большой запас механической энергии. Естественно, в их распространении большую роль играют и магнитные поля.

Не менее удивительной особенностью солнечной хромосферы является ее исключительная неоднородность, особенно относящаяся к температуре и скоро-

стям движения. Наиболее рельефно она проявляется в существовании крупномасштабных ячеек поля скоростей, средний размер которых составляет примерно 30 тыс. км. Эти ячейки называются супергранулами. Они тесно связаны с хромосферной сеткой, отчетливо наблюдаемой в линиях ионизованного кальция и красной линии водорода, а также с сеткой усиленного магнитного поля.

В красной линии водорода над солнечным лимбом можно наблюдать мелкие вертикальные выступы, которые и создают впечатление огненной прерии. Это спикулы. В среднем их диаметр составляет 1000 км, длина — 6—10 тыс. км, а температура — 10—20 тысяч градусов. Похоже на то, что они выбрасываются из нижней хромосферы со скоростью 20—30 км/с на высоту 9 тыс. км. Спикулы располагаются преимущественно на границах супергранул.

Гораздо труднее было изучить самую внешнюю часть атмосферы нашего дневного светила — солнечную корону. Плотность ее столь мала, а излучение столь слабо, что совсем недавно ее могли наблюдать только во время полных солнечных затмений. Из этих наблюдений астрономы узнали, что больше всего света корона излучает в особых «корональных линиях» и что она простирается в пространство на десятки солнечных радиусов. Только каких-нибудь 40—50 лет назад астрономы впервые сумели наблюдать внутреннюю часть солнечной короны вне затмения с помощью специального инструмента — внезатменного коронографа, в котором создается искусственное полное солнечное затмение и частично устраняется рассеянный свет неба и инструмента. Примерно в то же время была раскрыта загадка таинственного элемента «корония», которому приписывались яркие линии короны. Оказалось, что они вызваны свечением железа и никеля, только находящихся в совершенно необычном состоянии, когда вследствие исключительно высокой температуры (примерно 1—2 млн. градусов) и разреженности атомы этих химических элементов теряют от девяти до четырнадцати электронов.

Солнечная корона имеет сложную структуру. Первая из ее составляющих, «электронная» корона, представляет собой непрерывное излучение, которое возникает вследствие рассеяния фотосферного света на

свободных электронах. Это было установлено еще тогда, когда при наблюдениях полных солнечных затмений выявили зависимость степени поляризации света короны от длины волны, позиционного угла и яркости. Вторая, «эмиссионная» корона, дает излучение в корональных линиях, о которых мы уже говорили. Иногда говорят еще о третьей составляющей, которая характеризуется однородным распределением ее неполяризованного излучения вокруг Солнца и появлением в нем фраунгоферовых линий. Ее яркость сравнительно медленно убывает с расстоянием. Но оказалось, что связь этой составляющей с Солнцем кажущаяся и обусловлена исключительно свойствами рассеяния света пылинками в межпланетном пространстве.

Солнечная корона излучает в видимой, далекой ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра, а также в дециметровых и метровых длинах волн радиодиапазона. Для нее характерна большая неоднородность плотности и отчасти температуры. Из-за высокой температуры и весьма малого ее изменения с высотой, а также высокой теплопроводности, корона не может находиться в стационарном состоянии и расширяется по законам гидродинамики. Это приводит к непрерывному истечению потоков частиц из Солнца, называемых солнечным ветром. Корона обладает магнитными полями, во многом определяющими особенности ее и солнечного ветра.

Заканчивая краткий обзор строения солнечной атмосферы, вновь напомним, что главное свойство ее состоит в том, что весьма высокие температуры и сильная разреженность вещества создают в ней такие условия, при которых газ существует в виде смеси положительно и отрицательно заряженных частиц, т. е. в форме плазмы, и что на поведение этой плазмы сильный отпечаток накладывает магнитное поле.

4. Магнитные поля и движения солнечной плазмы

До сих пор мы подчеркивали, что Солнце — звезда спокойная. Но спокойствие это только относительное. На самом деле солнечная атмосфера подобна бурлящему океану, вид которого то и дело изменяется. И все же не движения вещества и не другие разнообразные явления, наблюдаемые в его атмосфере, служат опре-

деляющим признаком изменчивости нашего дневного светила. Такую роль играют солнечные магнитные поля.

Долгое время наблюдения Солнца были уделом астрономов-любителей, которым мы обязаны не одним важным открытием. Но только со второй половины XIX в. начались его астрофизические исследования. И хотя магнитные поля на Солнце были открыты еще в начале нынешнего столетия, потребовалось больше сорока лет, чтобы получить хотя бы в общих чертах картину солнечного магнетизма. Решающую роль в этом сыграл созданный в начале 50-х годов американскими астрофизиками Бэбкоками солнечный магнитограф, который позволил измерять магнитные поля напряженностью до десятых долей гаусса. С его помощью были не только проведены первые надежные измерения фотосферных магнитных полей в полярных областях Солнца, но и открыты магнитные звезды.

Говоря о структуре солнечных магнитных полей, надо отчетливо представлять себе, что измерения, с помощью которых ее изучают, усреднены по площадкам на Солнце поперечником в десятки тыс. километров (и лишь в редких случаях имеющих размеры 2—3 тыс. километров) и что измеряется, как правило, только составляющая магнитного поля по лучу зрения. Поэтому приводимая здесь схематическая картина фотосферных магнитных полей является только грубым приближением и относится в основном лишь к крупномасштабным полям с напряженностью от нескольких до десятков гаусс. Такими магнитными полями обычно занято от 50 до 75% площади солнечной фотосферы.

Магнитное поле Солнца состоит из двух главных составляющих: полоидальной (вдоль его меридиана) и тороидальной (вдоль его параллелей). Полоидальное поле сосредоточено главным образом в полярных областях до гелиографических широт 55° . Его средняя напряженность не превышает 1—2 Гс. Тороидальное поле располагается по обе стороны от экватора на более низких широтах. Его средняя напряженность составляет десятки гаусс, а в отдельных областях достигает 100—150 Гс. Эти составляющие как бы взаимно дополняют друг друга: когда первая из них достигает максимального значения напряженности, вторая обладает

минимальной ее величиной. Полярности их изменяются со временем тоже в противофазе.

Тороидальное магнитное поле характеризуется двумя типами магнитных областей: биполярными и униполярными. Биполярные области обычно имеют два четко выраженных магнитных полюса противоположной полярности и существуют в течение 2—3 солнечных оборотов. Униполярные области обладают одной преимущественной полярностью, поскольку вторая настолько слаба, что вообще не поддается измерению, и отличаются гораздо большей «живучестью» (до 6—7 солнечных оборотов). Они располагаются, как правило, несколько ближе к полюсам и отличаются значительно меньшей напряженностью поля, чем биполярные. На магнитные области тороидального поля, особенно биполярные, сильно воздействует дифференциальное вращение Солнца.

Характерной особенностью солнечных магнитных полей является усиление их на границах супергранул, которые, как уже говорилось, представляют собой ячейки конвективных движений солнечной плазмы. Сейчас можно уверенно утверждать, что значительная часть магнитного потока сконцентрирована именно на этих границах. Такая ситуация служит лучшим свидетельством тесной связи между магнитными полями и движениями в атмосфере Солнца.

Крупномасштабные детали магнитного поля одной полярности, как правило, стремятся к сближению и объединению. Именно таким образом появляются устойчивые ряды и «потоки» этих деталей, а также гигантские регулярные структуры поперечником до 400 тыс. км, по-видимому, тоже связанные с конвективными движениями.

Пока мы говорили только о солнечных магнитных полях небольшой напряженности, которые иногда не совсем точно называют фоновыми. Более детальные исследования показывают, что обычно они концентрируются в тонкие магнитные силовые трубки напряженностью 1500 Гс. Магнитные поля Солнца весьма разнообразны и по своей силе. Так, впервые обнаруженные в начале нынешнего века магнитные поля солнечных пятен имеют напряженность до 4000 Гс. Именно по ним и был установлен магнитный цикл нашего дневного светила.

В верхних слоях солнечной атмосферы, хромосфере и короне магнитные поля несколько больше, чем в фотосфере и по напряженности лишь немного уступают им. Итак, магнитные поля, в сущности, пронизывают все Солнце и даже выносятся солнечным ветром в межпланетное пространство. Они регулируют движения солнечной плазмы и другие ее характеристики. Учитывая все это, можно определенно утверждать, что Солнце является магнитно-переменной звездой, хотя переменность эта неизмеримо слабее, чем у некоторых особых звезд, которые называют магнитными.

5. Солнце и Земля

Естественно, что обитателя Земли больше всего интересует своеобразная переменность нашего дневного светила, или, как чаще ее называют, солнечная активность. Хотя этим вопросом ученые занимаются уже больше двухсот лет, только в последние десятилетия, когда на смену чисто статистическим исследованиям пришли комплексные работы, использующие самые совершенные средства наблюдения (как с Земли, так и из стратосферы, а также с искусственных спутников Земли и космических ракет), был достигнут существенный прогресс в изучении солнечной переменности.

В этой книге сделана попытка кратко суммировать современные представления о солнечной активности. Особое внимание будет уделено наиболее общим ее закономерностям, связанным с изменениями (количественными и качественными) этих явлений со временем.

Читателя не должно удивлять то обстоятельство, что нам не удастся ответить на многие из поставленных здесь вопросов. Дело в том, что если в прошлом столетии о Солнце, как считали ученые того времени, знали всё (уровень наблюдений тогда позволял получить лишь немногочисленные данные), то нынешнее обилие данных значительно усложнило положение. Теперь вряд ли можно найти исследователя Солнца, который мог бы твердо сказать, что ему удалось понять сущность солнечной активности и построить единую теорию. Но это совсем не значит, что ныне исследователи Солнца хуже понимают то, что на нем происходит. Они ближе подошли к решению своей основной задачи —

поставить Солнце на службу человечеству. Эти, пожалуй, слишком «пышные» слова сводятся к умению достаточно надежно предвидеть те или иные явления солнечной активности и их воздействия на Землю в самом широком смысле этого слова. Если подходить к оценке современных знаний о Солнце именно с этой меркой, то станет ясным, что хотя сейчас мы находимся гораздо ближе к осуществлению заветной цели, тем не менее мы еще далеки от полного успеха в познании природы солнечной активности.

Здесь мы не собираемся специально останавливаться на многочисленных проявлениях воздействия солнечной активности на Землю, поскольку это очень большая и интересная самостоятельная тема для специального разговора. Ограничимся только самыми общими замечаниями по этому вопросу. Ранее мы уже говорили о том, что Солнце в свое время «определило» условия в атмосфере нашей планеты. Но, к сожалению, к этому «доброму делу» оно нередко добавляет такие, которые никак не назовешь добрыми. Еще в середине прошлого века было обнаружено, что Солнце вполне в состоянии «сбивать» с пути корабли, приводя магнитную стрелку компаса в «самое хаотическое состояние». Это солнечные частицы, врываясь в магнитосферу Земли, вызывают возмущения ее магнитного поля, так называемые геомагнитные бури. Ныне мы знаем, что различные виды солнечного излучения и солнечные частицы, которые вырываются из атмосферы Солнца, непосредственно воздействуют на магнитосферу нашей планеты. Помимо геомагнитных бурь, они вызывают внезапные нарушения радиосвязи, особенно в диапазоне коротких волн, и полярные сияния. Кроме того, солнечная активность приводит к ослаблению космических лучей, проходящих к нам из Галактики, или приносит в окрестности Земли протоны солнечных космических лучей.

Гораздо сложнее проявление солнечной активности в нижней атмосфере Земли — тропосфере. Это воздействие бывает прямым только в редких случаях. Чаще всего оно является опосредованным: изменения условий в верхней атмосфере постепенно «раскачивают» тропосферу и приводят к колебаниям погоды и климата. Ведь нижняя атмосфера — очень инертная, с трудом поддающаяся «раскачке» система. Но если в течение длительного времени подвергать ее «давлению» в

одном направлении, даже совсем незначительному, результат может оказаться довольно внушительным. Именно так и воздействует солнечная активность на тропосферу.

Можно найти немало статей и даже книги, в которых обсуждаются вопросы влияния солнечной активности на уровень озер и грунтовых вод, на животный и растительный мир, на здоровье человека. Если сейчас эти вопросы еще находятся в стадии статистической разработки, то это совсем не значит, что такие исследования лишены смысла. Просто всегда легче сначала обнаружить такие связи, которые сразу всплывают на поверхность.

Итак, мы видим, что воздействие Солнца на Землю является весьма разносторонним. И трудно сказать, известны ли нам в настоящее время все стороны этого воздействия.

Теперь, после этого несколько затянувшегося (но, надеюсь, не без пользы для дальнейшего понимания) введения, мы можем перейти к нашему основному предмету — солнечной активности.

Глава 2

ЧТО ТАКОЕ СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ?

1. Солнце спокойное и активное

Как уже говорилось, вещество Солнца вечно находится в движении — то упорядоченном, то хаотическом. Его атмосфера, столь неоднородная во многих отношениях, то и дело испытывает в разных местах весьма различные изменения температуры, плотности, давления, напряженности магнитного поля. На первый взгляд (особенно, если рассматривать маленькие области солнечной атмосферы, поперечником в несколько сотен километров) эти изменения выглядят неупорядоченными и в них совершенно невозможно разобраться. Казалось бы, все это не имеет никакого отношения к солнечной активности. Действительно, явления, о которых идет речь, очень разнообразны, хотя бы потому, что они происходят в разных областях атмосферы Солнца, обладающих различными физическими условиями. Тем не менее они тесно связаны друг с другом,

видимо потому, что вызывает их какая-то общая причина.

Но где лежит граница между солнечной активностью и тем, что исследователи Солнца привыкли называть спокойным Солнцем? И является ли эта граница стабильной?

Обычно солнечной активностью называют целый комплекс различных явлений, происходящих в атмосфере Солнца, которые охватывают сравнительно большие области, поперечником не менее нескольких тысяч километров, и отличаются весьма значительными изменениями со временем физических характеристик соответствующих слоев солнечной атмосферы.

Пока ученые интересовались средними характеристиками того или иного слоя солнечной атмосферы и старались избегать тех областей, в которых эти характеристики резко выделялись, именно эти области и рассматривались как проявления солнечной активности. Но пришло время, когда исследователи Солнца заинтересовались детальным строением не только активных образований, но и «спокойных» областей Солнца. Тогда некоторые ученые стали склоняться к мнению, что никакой резкой границы между активными и спокойными областями нашего дневного светила вообще нет. Все Солнце бурлит, изменяется. И стоит ли вводить какое-то условное разделение, если дело только в масштабе происходящих явлений?

На первый взгляд может показаться, что и автор этой книги является сторонником такой крайней точки зрения; ведь он начал с описания именно «бурлящего» Солнца. Но это было сделано лишь для того, чтобы показать, что спокойное Солнце отличается не только масштабами явлений, но также их хаотичностью, а солнечная активность — упорядоченностью. В принципе можно согласиться с тем, что граница между «спокойным» и «активным» Солнцем весьма условна. Дальнейшие исследования помогут уточнить эту границу. Сейчас же у нас пока нет оснований отступать от классического определения солнечной активности. Единственно, в чем мы сделаем отступление, это в том, что не будем игнорировать микроструктуру активных образований на Солнце, поскольку понимание ее природы значительно способствует раскрытию сущности этих явлений.

2. Солнечные пятна

Совсем недавно, какую-нибудь сотню с небольшим лет назад, когда говорили о солнечной активности, то подразумевали солнечные пятна. Если даже не уходить в глубь веков, можно вспомнить, что еще в Древней Руси сквозь дым лесных пожаров люди видели «темные пятна, аки гвозди». Они боялись этих пятен, считали их дурным предзнаменованием. Затем в начале XVII века Галилей впервые направил телескоп на Солнце и с тех пор начались более или менее регулярные наблюдения солнечных пятен. А с середины XIX столетия эти наблюдения ведутся ежедневно, если позволяет погода.

Больше ста лет посвятили исследователи Солнца изучению солнечных пятен. Но мы нисколько не погрешим против истины, если возьмемся утверждать, что и теперь среди явлений солнечной активности трудно найти более сложное и во многих отношениях непонятное образование, чем солнечное пятно. Перечень достаточно уверенных заключений о его природе невелик. Мы и начнем с этих, так сказать, азбучных истин.

Солнечные пятна представляют собой относительно холодные места фотосферы Солнца. Температура их на $1500\text{—}2000^\circ$ ниже температуры окружающей среды. Поэтому по контрасту они кажутся нам темными. Пятна имеют тарелкообразную форму с «дном» на глубине $700\text{—}1000$ км.

В начале нынешнего столетия было обнаружено, что солнечные пятна обладают сильным магнитным полем. Согласно теории Л. Бирмана, такое поле в состоянии уменьшить или даже подавить конвективный перенос энергии в подфотосферных слоях. Таким образом в них создается дефицит выходящей лучистой энергии. На этом основании считают, что именно магнитное поле является виновником низкой температуры солнечных пятен, поскольку оно не позволяет переносить энергию из более низких слоев в более высокие. Напряженность магнитного поля пятен всегда больше 1500 Гс, а в большинстве случаев составляет $2000\text{—}3000$ Гс. Иногда она достигает даже 5000 Гс. Размеры солнечных пятен весьма разнообразны. Они колеблются от тысячи до десятков тысяч километров.

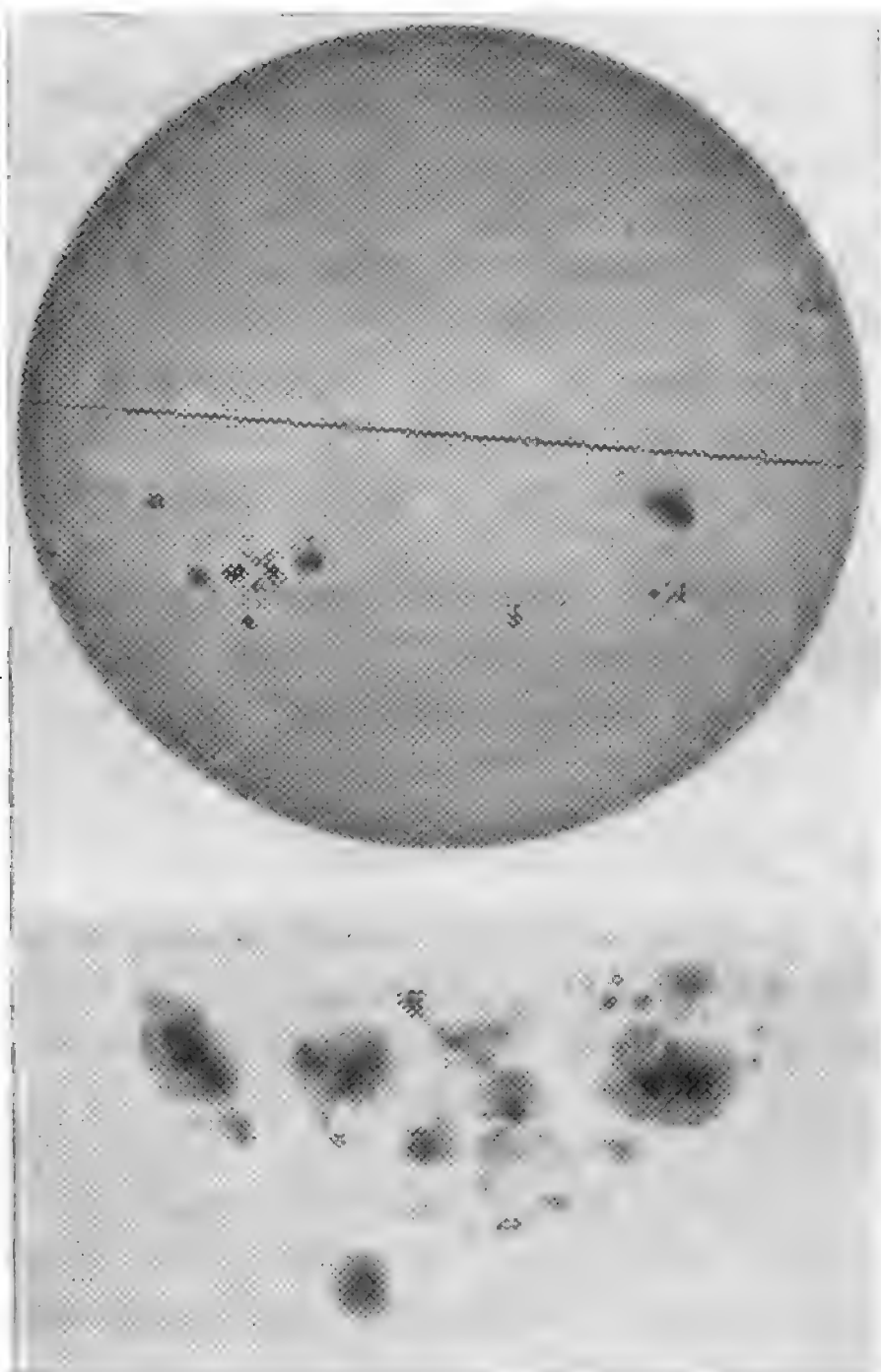
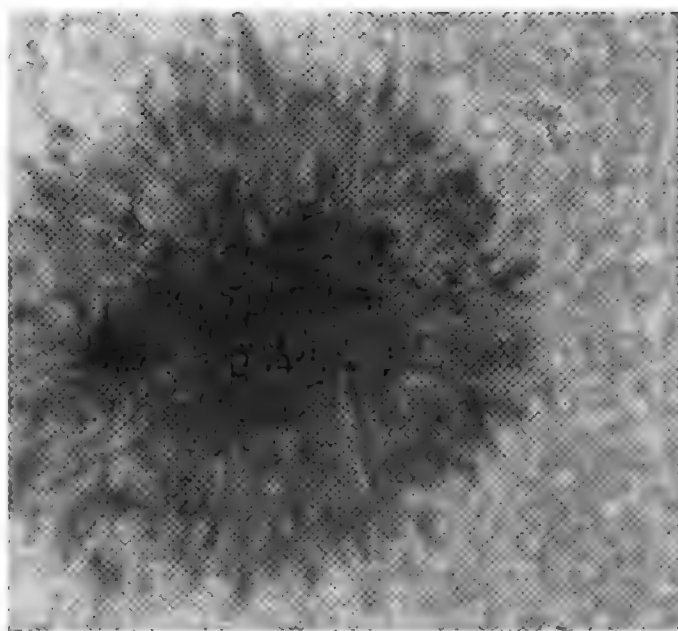


Рис. 1. Снимок солнечного пятна, полученный 30 июня 1970 г. на советской стратосферной обсерватории (вверху). Солнечный диск 26 июля 1981 г. в белом свете и увеличенная фотография группы солнечных пятен, расположенная слева внизу на диске (Горная астрономическая станция ГАО АН СССР) (внизу).

Солнечные пятна (рис. 1) имеют довольно сложное строение. Самая темная внутренняя их часть называется тенью или ядром. Она в большинстве случаев окружена более светлой волокнистой структурой, которая называется полутенью. Наличие полутени служит признаком устойчивости пятна, как бы большей его «живучести». Нередко встречаются и солнечные пятна без полутени. Обычно они существуют немногим более одних суток и в течение часов остаются неизменными. Размеры их колеблются от 1000 до 3500 км. Такие пятна называют пóрами. Рассмотрим основные особенности правильных пятен, т. е. пятен без заметных отклонений от круглой формы.

Тень пятна в среднем занимает 0,17 его общей площади и составляет всего 5—15% яркости фотосферы в видимом свете. Раньше многие исследователи Солнца считали, что чем больше размер пятна, тем темнее его тень. Сейчас это утверждение представляется весьма сомнительным. В течение долгого времени было общепринято, что, в отличие от полутени, вся площадь тени пятна является однородно темной. Однако наблюдения из стратосферы показали, что она обладает большой неоднородностью и активностью.

В тени пятен, как правило, наблюдаются очень маленькие яркие точки диаметром 100—150 км. Они существуют иногда до трех часов и значительно горячее остального вещества ядра. В тени среднего по размеру пятна одновременно появляется примерно 20 ярких точек. Они свидетельствуют о неоднородности магнитного поля ядра пятна. Дальними «родственниками» ярких точек, по-видимому, можно считать вспышки в тени *). Это быстро изменяющиеся яркие неоднородности, которые лучше всего заметны в фиолетовых линиях ионизованного кальция H и K и отчасти в красной линии водорода H α . Вспышки в тени длятся примерно 50 с, повторяются каждые 100—200 с, передвигаясь по направлению к полутени со скоростью около 40 км/с. Диаметр их составляет примерно 200 км, а напряженность магнитного поля — 2000 Гс. Следует, однако, отметить, что пока неизвестно, связаны ли эти вспышки с

*) Нужно иметь в виду, что «вспышки в тени», как и «вспышки в полутени» (см. стр. 26), не следует путать с солнечными вспышками, о которых говорится в разделе 4 этой главы.

яркими точками тени. Скорее всего, они порождены волновыми процессами, образующимися в более низких слоях ядра пятна. В тени многих солнечных пятен, хотя и не всех, отмечались колебания скорости по лучу зрения с периодом около 165 с и амплитудой 0,2 км/с. Кроме того, там наблюдались колебания магнитного поля.

Еще более сложна структура полутени пятен. Как показало изучение снимков с высоким разрешением, в частности, полученных из стратосферы, она состоит не просто из светлых и темных волокон, как считалось совсем недавно. Примерно 43 % площади полутени занимают яркие зерна вытянутой формы длиной 350—1500 км и шириной 100—350 км, которые медленно движутся по направлению к тени пятна со скоростью до 0,5 км/с. Скопление их на границе тень — полутень создает так называемое внутреннее светлое кольцо Секки. В темных областях полутени, наоборот, происходит быстрое вытекание вещества из пятна со скоростью примерно 6 км/с. В полутени пятен правильной (т. е. круглой) формы наблюдаются бегущие волны, которые возникают внутри тени непосредственно вблизи ее границы и распространяются наружу со скоростью около 20 км/с. В красной линии водорода видны вспышки в полутени, амплитуда скорости которых равна 1 км/с, а период — 210—270 с.

В полутени пятна магнитное поле гораздо слабее, чем в тени. Видимые в ней образования говорят о направлении не только движений вещества, но и о направлении силовых линий магнитного поля. Имеются веские доводы в пользу того, что ядро пятна является более глубинным образованием, а полутень относится к поверхностным слоям вблизи фотосферы Солнца.

Наконец, вокруг полутени наблюдается яркое или светлое кольцо. Яркость его превышает яркость окружающей фотосферы примерно на 3—4%. Это кольцо в течение почти тридцати лет было предметом ожесточенных споров, причем речь шла даже не о его свойствах, а о реальности самого его существования. Под давлением авторитета некоторых видных исследователей Солнца светлые кольца были надолго как бы забыты. И только в последние 10—15 лет они вызвали к себе большой интерес. Теперь уже никто не сомневает-

ся в том, что они реально существуют. Но как следует из наблюдений с высоким разрешением, их нельзя считать кольцами в буквальном смысле этого слова. Они представляют собой скопление маленьких ярких элементов, вынесенных на границу полутени, и обладают довольно неправильной формой. Причиной возникновения внешних светлых колец, по-видимому, служит избыток энергии, который переносится к поверхности веществом, отброшенным от области сильного магнитного поля в центральной части пятна.

Магнитное поле пятен имеет весьма сложную структуру. В какой-то степени оно напоминает веер. В ядре пятна его силовые линии практически перпендикулярны к видимой поверхности Солнца, тогда как на внешней границе полутени почти параллельны ей. В пятнах любой формы и сложности, в том числе в правильных, наблюдаются движущиеся магнитные образования поперечником менее 1500 км. У растущих пятен такие образования чаще всего смещаются внутрь пятна (даже его тени) или поры со скоростью 0,25—1,0 км/с. Все такие элементы имеют ту же полярность, что и само пятно. У распадающихся пятен обычно отмечаются движения магнитных образований наружу. Лучше всего они заметны в виде ярких точек, которые движутся радиально от пятна к магнитной сетке со скоростью до 2 км/с (по наблюдениям в фиолетовом крыле линии ионизованного кальция К и в линии циана). Особенно часто их наблюдают в распадающихся пятнах, окруженных областью, которая лишена устойчивого магнитного поля и простирается на 10—20 тыс. км от края пятна,— так называемым рвом. Отдельные элементы выходящего магнитного потока могут иметь любую полярность, но чаще характерную для пятна, из которого они выходят.

Спектральные наблюдения вблизи солнечных пятен (а иногда и далеко от них) позволяют обнаружить небольшие области поперечником примерно 1000 км, обладающие магнитным полем напряженностью 1400—2000 Гс, которые называются магнитными узлами. Обычно их полярность противоположна полярности ближайших пятен. Они существуют в среднем около часа. Полагают, что именно через магнитные узлы магнитное поле солнечных пятен возвращается в фотосферу.

Как уже отмечалось, движение вещества в тени пятна сильно затруднено существующим в нем сильным вертикальным магнитным полем. Что же касается полутени, в которой магнитное поле почти горизонтальное, то в ней на уровне фотосферы движение направлено от центра пятна, тогда как в самых верхних ее слоях,— наоборот, как бы внутрь пятна.

Правильные пятна встречаются довольно редко. Чаще всего форма пятна бывает далека от «совершенства». К тому же пятна «предпочитают» появляться группами. Далеко не всегда им удается «обзавестись» полутенью. Таких пятен, или пор, о которых уже говорилось в этом разделе, подавляющее большинство; они существуют от нескольких часов до нескольких суток. Если же группа пятен большая и сложная, то она состоит по крайней мере из двух больших пятен, множества мелких пятен и пор между ними. Основными пятнами группы являются ведущее и хвостовое. Первое из них расположено к западной части группы, т. е. в ее «голове», второе находится сзади, или в «хвосте». Обычно они имеют весьма замысловатый вид. Ведущее пятно чаще всего бывает многоядерным, т. е. полутень его окаймляет два или более ядер. Нередко эти ядра даже не совсем отделены друг от друга. Особенно рыхлым выглядит хвостовое пятно. Бывает, что оно чуть ли не с момента появления распадается на множество мелких пятен и пор. В некоторых самых сложных группах имеется несколько основных пятен. Ведущее и хвостовое пятна группы, как правило, обладают магнитными полями противоположной полярности. Даже в тех случаях, когда группа состоит из одного пятна, имеется и вторая ее часть, которая не видна. Практически она всегда сопутствует таким группам в форме магнитных узлов, о которых мы уже говорили.

Группы солнечных пятен появляются не по всему диску Солнца, а только в так называемых «королевских зонах», расположенных на расстоянии примерно до 40° по обе стороны от солнечного экватора. В некоторых случаях их наблюдали даже до широты $\pm 52^\circ$, но это были крайне неустойчивые мелкие пятна и поры. Вблизи самого экватора, до широты $\pm 5^\circ$, пятна также встречаются очень редко.

Характерно, что группы пятен практически всегда вытянуты приблизительно вдоль солнечных параллелей,

Однако ведущее пятно обычно расположено ближе к экватору, чем хвостовое. Этот наклон оси групп к параллели в среднем увеличивается по мере удаления от экватора Солнца. Особенно велик он бывает у короткоживущих мелких групп пятен и пор, сопутствующих большим сложным группам.

Площадь основных пятен группы и ее суммарная площадь возрастают с момента ее появления в течение нескольких дней. Этот рост происходит по-разному у разных групп в зависимости от их структуры, размеров и других характеристик. В это же время увеличивается и напряженность магнитного поля. С развитием группы основные ее пятна постепенно удаляются друг от друга, т. е. общий размер группы возрастает. После того как группа достигает максимального развития, площадь ее убывает довольно быстро, что нередко приводит к скорому ее разрушению. При этом в сравнительно сложных группах, которые называют биполярными, хвостовое пятно, промежуточные пятна и поры обычно исчезают и сохраняется только ведущее пятно. Постепенно оно приобретает все более правильную форму, становясь более устойчивым. После исчезновения устойчивой части убывание площади групп постепенно замедляется. Как только размер пятна достигает критической величины — примерно 30—40 тыс. км в поперечнике — оно быстро разрушается. Весьма вероятно, что убывание площади пятен происходит не постепенно, а скачками. В зависимости от размеров этой площади, напряженности магнитного поля, а также расположения на диске Солнца группа пятен существует от нескольких часов до нескольких месяцев. В значительной степени продолжительность ее существования зависит от характера стадии разрушения. В это время напряженность магнитного поля пятен постепенно убывает, тогда как размеры групп в большинстве случаев не уменьшаются, а иногда даже продолжают возрастать.

3. Факельные площадки

Группы солнечных пятен вблизи края видимого диска Солнца всегда наблюдаются на уровне фотосферы в окружении светлых волокнистых образований (рис. 2). Это фотосферные факелы, которые были известны и регулярно наблюдались еще с середины прошлого столетия.

В фотосферных наружных слоях они горячее, чем окружающая их среда. Вид их весьма разнообразен. Самые яркие из фотосферных факелов обычно выглядят как более компактные образования, в которых светлые



Рис. 2. Фотосферные факелы с группами солнечных пятен 30 августа 1980 г. (Горная астрономическая станция ГАО АН СССР).

волоконца тесно прилегают друг к другу. Менее контрастные отличаются и большей рыхлостью. Волоконца в них располагаются на значительных расстояниях друг от друга. Порой их даже трудно отличить от окружающей фотосферы. Такие факелы чаще всего наблюдаются без солнечных пятен.

Ближе к центру видимого солнечного диска фотосферные факелы практически не видны, поскольку в этих местах излучение выходит из более глубоких слоев, в которых излучение факела и фотосферы практически одинаково. Если бы не это обстоятельство, то фотосферные факелы можно было бы наблюдать на всем солнечном диске, а не только в течение 3—4 дней вблизи его восточного и западного краев. Вблизи солнечного лимба отчетливо различаются факельные гранулы диаметром 750—1500 км. По-видимому, они представляют собой скопления неразрешенных ярких точек факелов, которые хорошо видны при наблюдениях в крыльях линии ионизованного кальция К в факелах без солнечных пятен. Фотосферные факелы являются областями усиленного магнитного поля и движения. Правда, их магнитное поле имеет напряженность в десятки раз меньшую, чем поле солнечных пятен. Но зато оно в несколько раз превосходит напряженность магнитного поля в окружающей невозмущенной фотосфере.

Фотосферные факелы служат как бы нижним этажом факельных площадок, которые пронизывают фотосферу и хромосферу. В хромосфере они наблюдаются в красной линии водорода H_α , фиолетовых линиях ионизованного кальция Н и К, а также в линиях ионизованного гелия и других химических элементов в ультрафиолетовой области спектра. Особенно хорошо они заметны в линиях H_α , Н и К. Вид факельных площадок в этих линиях напоминает вид фотосферных факелов. Нередко их называют водородными и кальциевыми флоккулами. Кальциевые флоккулы (рис. 3), как правило, располагаются над фотосферными факелами и обладают такими же или даже большими размерами. Водородные флоккулы по своему расположению и площади выглядят как дальние родственники фотосферных факелов. Они, по-видимому, являются другим ярусом факельных площадок. Водородные флоккулы обычно значительно меньше по размерам, чем кальциевые, и не столь устойчивы. Структурные элементы факельных площадок можно проследить во всех слоях солнечной атмосферы, хотя с высотой размер их растет. Если в фотосфере их поперечник меньше 700 км, то в хромосфере по наблюдениям в линии ионизованного кальция К он в несколько раз больше, а в области, переходной от хромосферы к короне, равен 15 тыс. км.



Рис. 3. Солнечный диск в свете линии К ионизованного кальция 13 августа 1960 г. с кальциевыми флоккулами (вверху). Увеличенная фотография кальциевого флоккула с группой солнечных пятен (внизу) (Горная астрономическая станция ГАО АН СССР).

Факельные площадки — крайне неоднородные образования. Они характеризуются значительными колебаниями яркости, существенными различиями температуры, скорости движения вещества, напряженности магнитного поля в разных их местах. Размеры их весьма внушительны. Поперечник самых маленьких из них составляет десятки тысяч километров, а нередко достигает сотни тысяч километров. Живучесть факельных площадок значительно больше, чем солнечных пятен. Они существуют от нескольких дней до нескольких месяцев. В тех случаях, когда в них нет пятен, контраст и устойчивость их значительно меньше. Наличие в факельных площадках солнечных пятен как бы вливает в них новые силы и способствует их «долговечности».

В отличие от пятен, факельные площадки появляются по всему видимому диску Солнца, но вблизи полюсов они очень неустойчивы. Яркость и размеры их тоже гораздо меньше, чем у факельных площадок, расположенных в «королевских зонах». Средний их размер равен 2300 км. Обычно они существуют от нескольких часов до трех суток и располагаются, как правило, на гелиографических широтах, не ниже $\pm 60^\circ$. Эти полярные факельные площадки, или, как чаще их называют, полярные факелы, тесно связаны со структурой магнитного поля вблизи полюсов Солнца.

Факельные площадки, как и группы пятен, чаще всего вытянуты вдоль солнечных параллелей. Ведущая их часть, как правило, располагается ближе к экватору, чем хвостовая. Если в экваториальных зонах эти площадки имеют овальную или неправильную форму, то вблизи полюса они значительно более круглые.

Развитие факельных площадок начинается с увеличения их яркости и компактности. Если в них появляются солнечные пятна, то наряду с общей тенденцией развития наблюдается также усиление яркости в местах появления мелких пятен и пор. Площадь факельных площадок постепенно увеличивается. После исчезновения пятен «силы их выдыхаются». Они становятся более рыхлыми и все менее контрастными, но размер их все еще растет. Затем площадь их начинает уменьшаться и, наконец, факельная площадка «растворяется» в окружающей среде. Параллельно с этими изменениями происходят также изменения напряженности их магнит-

ного поля. Но даже после того как факельная площадка уже не видна, напряженность магнитного поля все еще превышает напряженность поля соседних областей атмосферы Солнца.

4. Солнечные вспышки

Иногда в факельных площадках, наблюдаемых в линии водорода H_{α} , внезапно происходит значительное увеличение яркости в отдельных местах, чаще всего вблизи сложных солнечных пятен (рис. 4). Это одна из особенностей, пожалуй, самого впечатляющего явления активности Солнца — солнечной вспышки, которую легче всего наблюдать. Хотя впервые солнечную вспышку заметили ещё в середине прошлого столетия, это было случайное наблюдение. Вспышка была исключительной силы, и ее видели в белом свете. Подобные вспышки можно буквально пересчитать по пальцам. Понадобилось более семидесяти лет упорной работы, прежде чем исследователи Солнца получили возможность наблюдать солнечные вспышки регулярно.

До сих пор мы знакомились с явлениями солнечной активности, время «жизни» которых составляет по меньшей мере несколько часов. Совсем иное дело вспышка. Нередко это настолько мимолетное явление, что его легко и пропустить. Большинство солнечных вспышек существует всего несколько минут, особенно если они слабые. Между тем погода далеко не всегда позволяет вести непрерывные наблюдения Солнца на протяжении нескольких часов. К тому же в одном пункте наблюдения Солнца даже при самых благоприятных условиях практически невозможно вести более 9—10 часов. Поэтому астрономы воспользовались тем обстоятельством, что в разных пунктах Земли восход Солнца происходит в разное время суток (по всемирному времени), и для «вылавливания» солнечных вспышек, или, как обычно говорят, «патрулирования» вспышек, распределили между собой периоды наблюдений. Чтобы обеспечить круглосуточное патрулирование, потребовались усилия ученых многих государств.

Хотя вспышки наблюдают регулярно немногим более 40 лет, трудно найти явление солнечной активности, которое столь сильно приковывало бы к себе внимание астрономов. Лишь за последние 15—20 лет мы узнали

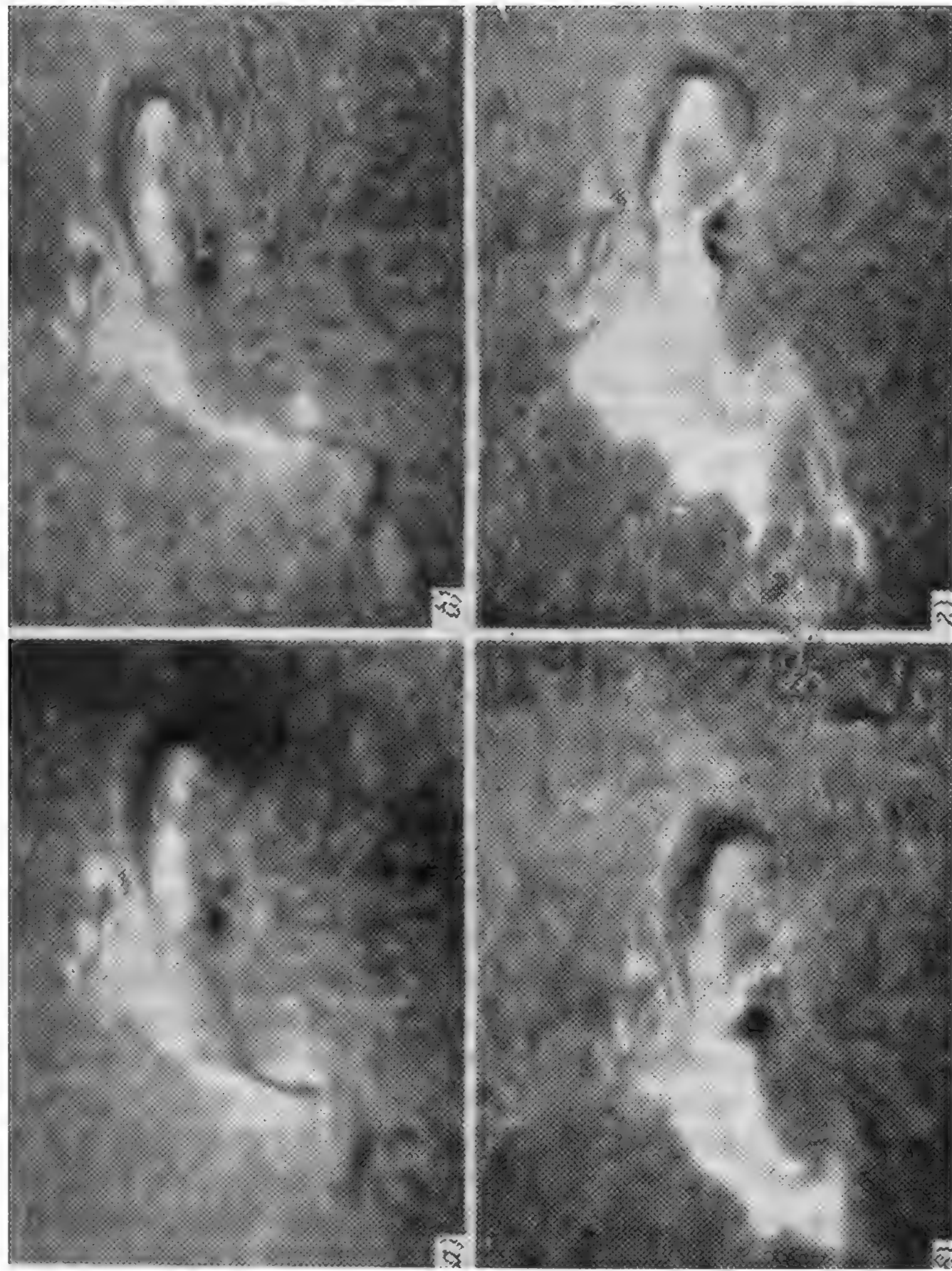


Рис. 4. Развитие солнечной вспышки 7 сентября 1973 г. в свете линии водорода H_{α} а) — $11^{\text{h}}28^{\text{m}}$, б) — $11^{\text{h}}37^{\text{m}}$, в) — $12^{\text{h}}00^{\text{m}}$, г) — $12^{\text{h}}17^{\text{m}}$; время всемирное (Горная астрономическая станция ГАО АН СССР).

о них больше, чем о солнечных пятнах за двести с лишним лет. Удивляться этому не приходится. Ведь именно солнечные вспышки «приносят» на Землю всякого рода неприятности и притом неожиданно. Появилось естественное желание хотя бы в какой-то степени научиться предвидеть подобные явления, не говоря уже о том, что вспышки представляют исключительный интерес для физиков, изучающих особенности поведения неустойчивостей плазмы.

Что же такое солнечная вспышка? Если говорить коротко, это своеобразный взрыв на Солнце, в результате которого происходит внезапное освобождение энергии, накопленной в ограниченном объеме солнечной атмосферы (чаще всего короны и хромосферы). Взрыв этот своеобразен, поскольку необычны условия, в которых он происходит, а многие его черты даже как бы противоречат тому, что мы привыкли связывать со взрывом. Именно поэтому в течение долгого времени, пока солнечные вспышки наблюдали только в линиях водорода, а затем в видимой области спектра, даже сама мысль о том, что вспышка — это явление взрывного характера, представлялась противоестественной. Тогда основным в явлении вспышки казалось внезапное увеличение яркости в свете водородных линий. Любопытно, что на этом основании был даже отвергнут термин «эрупция», т. е. «взрыв», предложенный для обозначения этого явления солнечной активности. Его заменили термином «вспышка» (flare), что по-английски означает «яркий неустойчивый свет».

Вспышка — очень сложное явление. Она проявляется прежде всего в кратковременном усилении электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн, от жестких рентгеновских лучей с длиной волны меньше 1 Å, а в редких случаях от гамма-лучей с длиной волны около 0,02 Å, до километровых радиоволн, и в выбросе ускоренных солнечных частиц. Кроме того, вспышки приводят к активизации процессов в других областях солнечной атмосферы, порой удаленных от них на десятки тысяч километров. А в некоторых наиболее мощных вспышках даже порождаются космические лучи, протоны которых обладают смертоносной энергией. Общая же энергия вспышки составляет 10^{29} — 10^{32} эрг, что сравнимо с энергией взрыва тысяч водородных бомб.

Подавляющее большинство солнечных вспышек происходит в районах групп солнечных пятен со сложным строением магнитного поля, особенно на ранних стадиях их развития. Но иногда их регистрируют и вдали от пятен, в старых рыхлых магнитных областях. Обычно им предшествует перестройка магнитного поля. Нередко она связана со всплыванием в этой области нового магнитного потока противоположной полярности. Такая перестройка проявляется по крайней мере в трех эффектах, доступных наблюдениям. Во-первых, в короне происходит усиление мягкого рентгеновского излучения. Во-вторых, в линиях крайней ультрафиолетовой области спектра (от 250 до 1350 Å) обнаруживается усиление нетепловых движений. В-третьих, происходит активизация спокойного темного волокна (см. следующий раздел), простирающегося вдоль линии раздела полярностей продольной (по лучу зрения) составляющей магнитного поля. Оно претерпевает разрывы, изменяет свою яркость или вовсе исчезает, затем появляясь вновь. Конечно, такие эффекты не всегда приводят к солнечной вспышке. Но они, как правило, всегда предваряют ее, по крайней мере на несколько минут, а порой и на десятки.

Сама солнечная вспышка обычно начинается быстрым возрастанием температуры короны примерно до 40 млн. градусов, приводящим к появлению всплесков мягкого рентгеновского излучения. Этот процесс длится от одной до нескольких минут. Вспышка «вдавливает» переходный слой между короной и хромосферой в хромосферу и благодаря теплопроводности нагревает несколько сотен километров верхней хромосферы до температуры 10 тыс. градусов. При этом регистрируется усиленное излучение в линии водорода H_{α} и в линиях крайней ультрафиолетовой области. Продолжительность вспышки в видимой области спектра составляет от нескольких минут до нескольких часов, причем возрастание интенсивности излучения в линии H_{α} до максимума происходит быстрее, чем последующий спад. Иногда наблюдается также микроволновой всплеск с постепенным подъемом и спадом потока радиоизлучения. У большинства солнечных вспышек, особенно слабых, которых называют субвспышками, этим все и кончается. Часто такие вспышки по характеру присущего им излучения определяют как тепловые.

На стадию теплового нагрева солнечной вспышки еще до достижения максимума яркости накладывается вторая импульсная, или взрывная стадия, в течение которой происходит ускорение электронов, а иногда и ядер атомов до энергий 10—100 кэВ. Ускоренные электроны вызывают импульсные всплески жесткого рентгеновского, далекого ультрафиолетового и микроволнового излучения. Область, в которой происходит этот импульсный процесс, гораздо меньше области тепловой вспышки. Практически все солнечные вспышки с импульсной стадией сопровождаются «расталкиванием» вещества и магнитного поля. Из большинства таких вспышек происходит выброс в наружные слои солнечной атмосферы вещества со скоростями до 400 км/с. Другим эффектом, связанным иногда с импульсной стадией, является всплеск III типа *) в метровом диапазоне радиоволн, который наглядно свидетельствует о движении электронов через корональную и межпланетную плазму со скоростью, большей 100 000 км/с. Его продолжительность составляет от одной до нескольких секунд. Следует, однако, помнить о том, что большинство всплесков III типа не связано со вспышками. Но уж если возникли импульсные вспышки, то выброшенные ими электроны заодно могут дать и такие всплески радиоизлучения.

Вспышки чаще всего происходят не в одиночку, а одновременно появляются в нескольких точках факельной площадки. Более того, эти места оказываются для них излюбленными и в последующее время. Бывает так, что в течение нескольких дней они то и дело возникают в тех же самых точках. Эти точки в значительной степени определяются структурой и изменением фотосферного магнитного поля. Наиболее благоприятной для появления вспышек является такая обстановка, когда два пятна с магнитными полями противоположного знака расположены очень близко друг от друга, а изменение магнитного поля от одной точки области к другой очень сильное. Тогда по обе стороны линии, вдоль которой напряженность продольного магнитного поля равна нулю, т. е. линии раздела его полярностей, возникают вспышки. Они как бы теснятся вокруг линии, потому

*) На основе спектральных наблюдений всплесков в метровом диапазоне радиоволн их делят на пять типов, различающихся по виду диаграммы «частота радиоизлучения — время».

что здесь создаются благоприятные условия для их появления. Следует иметь в виду, что речь в данном случае идет не о полном магнитном поле, а только о его составляющей по лучу зрения, или продольной составляющей. В то же время, вспышки возникают лишь в так называемых «особых» точках поперечной составляющей магнитного поля.

По своей максимальной площади, определяемой на основе наблюдений в линии H_{α} , солнечные вспышки делятся на пять классов. Самые маленькие из них, субвспышки, имеют площадь меньше 100 миллионных долей видимой полусферы Солнца (м. д. п.), т. е. меньше 300 млн. квадратных километров, самые большие, балла 4, больше 1200 м. д. п. Субвспышки в среднем живут меньше 18 минут, а самые большие вспышки — больше 3 часов. По максимальной интенсивности мягкого рентгеновского излучения в интервале 1—8 Å, измеренной в околоземном пространстве, вспышки делят на три класса (С, М, Х), причем самые мощные характеризуются потоком больше 10^{-1} эрг/см²·с. К сожалению, нет однозначного перехода между этими двумя классификациями солнечных вспышек. И хотя вторая из них более «физична», сейчас еще нет возможности для всеобщего ее использования из-за отсутствия регулярных наблюдений вспышек в рентгеновском диапазоне.

В самом начале этого раздела мы упомянули такое редкое явление, как вспышка в белом свете. Максимальная яркость таких вспышек превышает яркость фотосферы примерно на 50%. Белые вспышки имеют вид одной или двух ярких точек, расположенных на равном расстоянии от линии раздела полярностей продольного магнитного поля или внутри полутени пятен противоположной полярности. Обычно они появляются до максимума яркости вспышки в линии H_{α} и длятся примерно 10 мин. Скорее всего, вспышки в белом свете порождаются ускоренными частицами, которые бомбардируют нижние слои солнечной атмосферы.

Но самый большой интерес для нас представляют так называемые протонные вспышки, во время которых выбрасываются протоны с энергиями выше 10 МэВ. Строго говоря, их следует разбить на две группы. Первая, — вспышки космических лучей, — включает только те, когда испускаются протоны с энергиями выше 500 МэВ. Таких вспышек с 1952 г. было зарегистриро-

вано немногим более двух десятков. Вторая группа,— обычные протонные вспышки,— гораздо многочисленнее и отличается сравнительно заурядными энергиями протонов, 10—100 МэВ. Самая мощная вспышка космических лучей, зарегистрированная 23 февраля 1956 г., дала протоны с энергией 15 ГэВ.

Если вспышки космических лучей действительно чаще всего оказываются самыми интенсивными и в видимой области спектра, то этого нельзя сказать об обычных протонных вспышках. Поэтому выделение их характерных признаков является очень трудной задачей. Но если все-таки отмахнуться от того обстоятельства, что протонными в отдельных случаях были даже субвспышки, то можно указать наиболее характерные их особенности.

В отличие от других солнечных вспышек, протонные в свете линии H_{α} обычно выглядят как две яркие ленты, расположенные по обе стороны нулевой линии продольного магнитного поля. Известно, что солнечные вспышки, как правило, избегают «покрывать» тень солнечных пятен. Каждая лента протонной вспышки лежит над пятнами (или пятном) с магнитным полем одной полярности, «не боясь» закрыть их ядра. По-видимому, позволяет им это делать большая мощность таких вспышек. Более того, яркие ленты обычно со временем расходятся от нулевой линии поля со скоростями 10 км/с. Хотя особая структура магнитного поля групп пятен, о которой уже говорилось ранее, и служит непременным условием появления протонных вспышек, оно не является единственным.

Большое значение для возникновения подобных вспышек имеет наличие всплесков радиоизлучения II и IV типов. Всплески II типа представляют собой ударную волну, которая распространяется через корону и межпланетную среду со скоростями примерно 1000 км/с, и длятся в среднем 10 минут. Всплески IV типа, обычно занимающие широкую полосу длин волн, от сантиметров до декаметров, в таких вспышках имеют особенно сильную микроволновую составляющую. Кроме того, протонные вспышки всегда сопровождаются сильными всплесками на волне 10 см.

Во время протонных вспышек наряду с протонами выбрасываются и электроны с энергиями больше 40 кэВ, но они очень быстро теряют свою энергию и поэтому

поток их в межпланетном пространстве уменьшается по сравнению с потоком протонов той же энергии. Заметим, однако, что электронные вспышки (во время которых выбрасываются только электроны) отмечаются гораздо чаще протонных, обычно сопровождаемых всплесками III типа и микроволнового излучения, а также всплесками жестких рентгеновских лучей. Интересно, что в последние годы от нескольких протонных вспышек было зарегистрировано гамма-излучение, которое служит признаком наличия ядерных реакций в солнечной атмосфере. Оно появилось во время их импульсной стадии.

5. Протуберанцы

Как уже говорилось в предыдущем разделе, порой солнечные вспышки появляются вдали от пятен. В этих случаях они располагаются около образований червеобразной формы, лучше всего видных в красной линии водорода H_{α} . Это своеобразные облака, которые как бы подвешены над видимой поверхностью Солнца. Их называют волокнами (или протуберанцами). Заметим, что вспышки вблизи волокон крайне малочисленны и чаще всего очень слабы.

Если солнечные вспышки — весьма недолговечные образования, а пятна и факельные площадки — очень «живучие», то длительность существования волокон или протуберанцев отличается исключительным многообразием. Многие из них сохраняются на протяжении дней и даже месяцев. Но не меньшее количество протуберанцев существует всего по несколько минут, а порой даже меньше минуты.

На первый взгляд может показаться странным, почему одно и то же активное образование является обладателем сразу двух разных названий. Объясняется это чисто историческими причинами. Еще в начале прошлого столетия астрономы обнаружили во время полных солнечных затмений за розоватой полоской хромосферы живописно вытянутые наружу образования, которые тогда были названы протуберанцами. Впоследствии, после того как появилась возможность наблюдать солнечный диск в свете красной водородной линии, были обнаружены волокна. Не сразу стало ясно, что протуберанцы и волокна — это всего лишь две стороны одной и той же медали. Теперь-то мы знаем, что единственная

разница между ними заключается в том, что протуберанцы нам видны с ребра, а волокно — сверху. Вот и случилось так, что они получили разные названия. Впрочем, сейчас уже к этому привыкли и различие между этими терминами воспринимают только в смысле расположения протуберанца — на диске или на его краю.

Протуберанцы отличаются большей плотностью и более низкой температурой, чем корональная плазма. Характер и скорости их движений, напряженность магнитного поля и форма, не говоря уже о продолжительности существования, исключительно разнообразны.

Трудно найти солнечные активные образования более живописной формы, чем солнечные протуберанцы (рис. 5). Уже это навело первых их исследователей на мысль классифицировать протуберанцы по их форме. Достаточно хотя бы перечислить их названия: колпачковые протуберанцы, корональные облака, корональный дождь, холм, живая изгородь, дерево, ствол дерева, торнадо, фонтан, — чтобы мысленно представить себе многообразие этих форм.

Вместе с тем, если некоторые протуберанцы совершенно спокойны, другие вечно полны движения и то и дело подвергаются всевозможным метаморфозам. По изменчивости и характеру движения чаще всего их делят на три класса: спокойные, активные и эруптивные.

Первые почти не изменяют своей формы, развиваются очень медленно и отличаются большой продолжительностью жизни (до нескольких месяцев, в отдельных же случаях они существуют даже больше года). Им присущи только хаотические внутренние движения и изменения яркости отдельных узлов. Спокойные протуберанцы выглядят как длинные плоские листообразные структуры, почти перпендикулярные к видимой солнечной поверхности. Наиболее развитые из них имеют вид ряда арок или «деревьев» с основаниями на границах супергранулы. Они имеют в среднем длину 60—600 тыс. км, высоту 15—100 тыс. км, толщину 4—15 тыс. км. Спокойные протуберанцы характерны для областей со слабым магнитным полем. Они сами обладают магнитным полем напряженностью ниже 40 Гс. Вблизи экватора Солнца они располагаются почти вдоль меридианов или под малым углом к ним, а ближе к полюсам, начиная с широты примерно $\pm 40^\circ$, обычно вытянуты

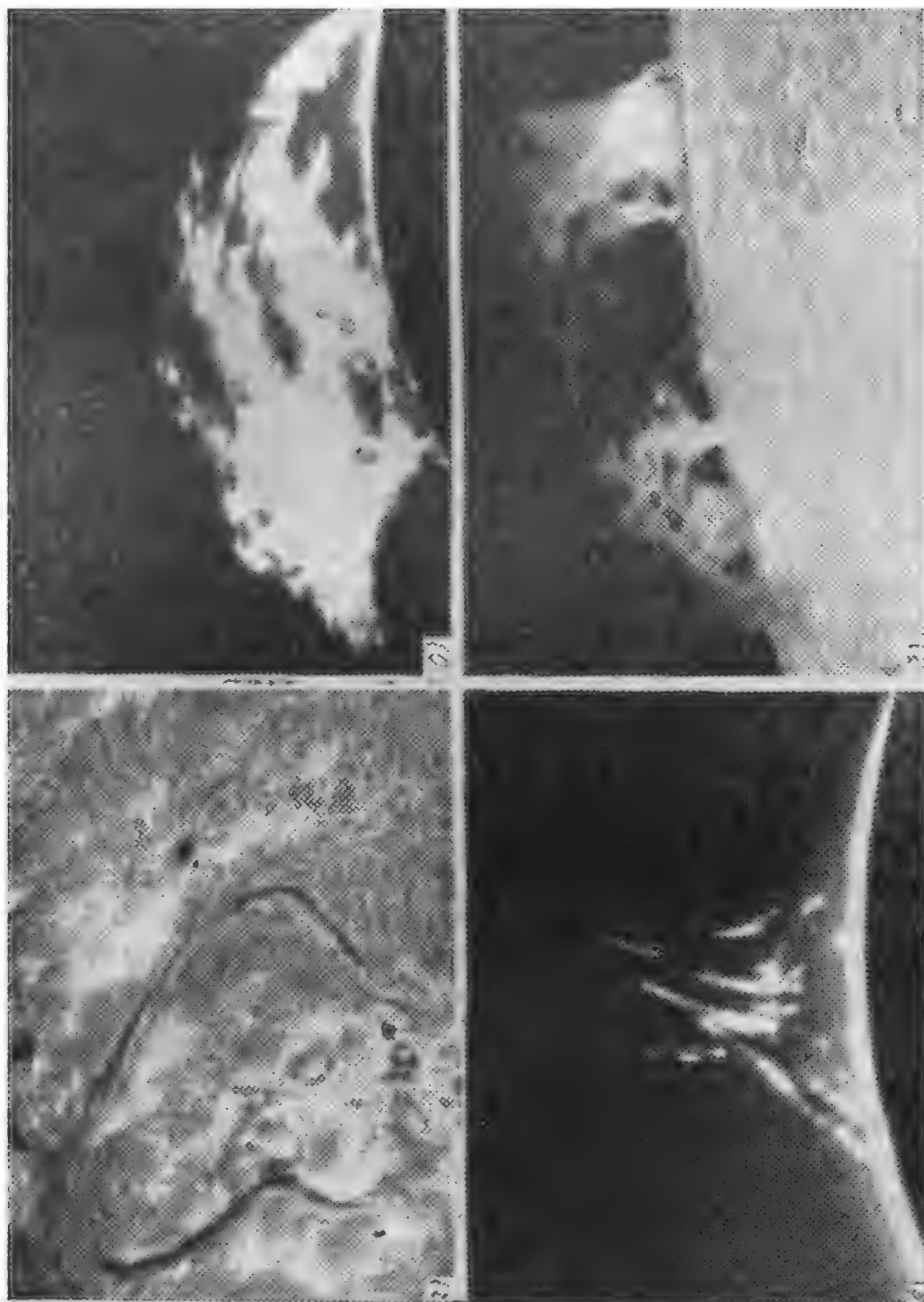


Рис. 5. Активная область 2 июня 1969 г. с водородными волокнами (а). Спокойный протуберанец 26 октября 1959 г. (б). Активный протуберанец 26 октября 1959 г. (в). Петельный протуберанец 5 июня 1969 г. (з). Все снимки получены в свете линии водорода H_{α} (Горная астрономическая станция ГАО АН СССР).

вдоль параллелей. Вокруг полярных шапок Солнца они образуют почти непрерывную корону *). Исчезновение спокойных протуберанцев связано с медленным рассасыванием, стеканием вниз в хромосферу или выбросом.

Активные протуберанцы выделяются сравнительно небольшими упорядоченными движениями и существуют не более нескольких часов. Движения их струй и узлов практически равномерны на большей части траектории с ускорением вблизи «центров притяжения» и характеризуются скоростями 10—100 км/с. Скорее всего, эти движения происходят вдоль силовых линий магнитного поля протуберанца, напряженность которого достигает 100 Гс. Средняя продолжительность существования протуберанцев этого типа составляет примерно 10 минут. Они имеют вид массы переплетающихся волокон, в которой заметны более яркие узелки. Наиболее типичной их формой являются петлеобразные структуры. Наблюдаются два типа протуберанцев, имеющих форму петель. Первые состоят из одиночной петли, по одной ветви которой вещество поднимается, а по другой спускается, чаще всего в солнечное пятно, со скоростью около 30 км/с. Среднее время их жизни равно 15 минутам, а средняя высота — 50 тыс. км. Вторые представляют собой систему петельных протуберанцев. Они выглядят как петельный туннель, состоящий из отдельных петель, которые связывают две яркие ленты вспышек. Движение вещества в них происходит вдоль обеих ветвей петель вниз со скоростью до 150 км/с. Такие протуберанцы живут до нескольких часов.

Для эруптивных протуберанцев характерны бурные и внезапные изменения всех свойств. С момента образования и до исчезновения они находятся в процессе развития, отличаются быстрыми и довольно беспорядочными движениями вещества и крайней неустойчивостью. Они редко живут более нескольких минут и в этом отношении весьма напоминают слабые вспышки. Обычно они поднимаются не непосредственно из хромосферы, а выходят из спокойных и активных протуберанцев. В этом смысле их можно рассматривать как особую стадию развития этих протуберанцев. Чаще всего эруптивные протуберанцы поднимаются до высот 100—500 тыс. км, но в отдельных случаях даже до

*) Этот термин не имеет ничего общего с солнечной короной.

1,5 млн. км. Наиболее типичными для них являются скорости движения вещества 100—300 км/с. Бывают случаи, когда они превышают критическую скорость нашего дневного светила, и тогда вещество эруптивных протуберанцев покидает Солнце.

Некоторые типы эруптивных протуберанцев, как и системы петельных протуберанцев, тесно связаны с солнечными вспышками, а иногда даже составляют часть процесса вспышки. Когда те и другие наблюдаются на краю видимого солнечного диска, их очень трудно отличить друг от друга. Только детальные спектральные

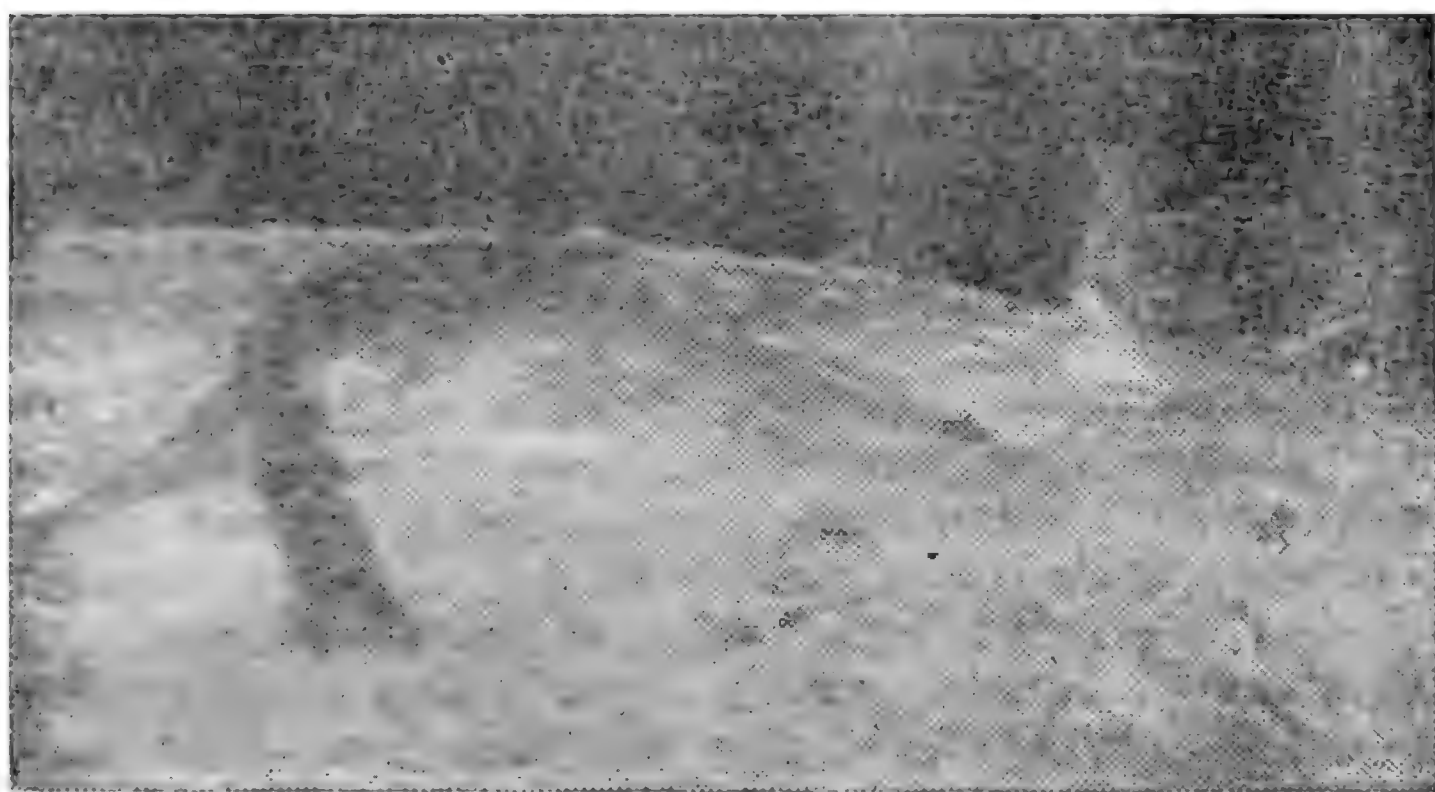


Рис. 6. Возвратный выброс 5 июня 1969 г. в свете линии водорода H_{α} (Горная астрономическая станция ГАО АН СССР).

исследования позволяют решить вопрос, что же мы наблюдали, протуберанец или вспышку. Это прежде всего протуберанцы-выбросы. Наиболее распространенными среди них являются возвратные, диффузные и веерообразные выбросы.

Возвратные выбросы выглядят как прямые или слегка искривленные выступы, которые вылетают из небольшого яркого холма со скоростью 100—200 км/с и достигнув высоты 200 тыс. км. возвращаются обратно по той же траектории (рис. 6). Это движение определенно происходит вдоль магнитных силовых линий. Возвратные выбросы наблюдаются нередко несколько раз за время существования вспышки. Многие из них начинаются на границах полутени и направлены по радиусу

от пятна. Напряженность их магнитного поля равна примерно 50 Гс и убывает с высотой. Возвратные выбросы видны не только на краю диска Солнца, но и на диске, подобно спокойным волокнам. Возвратному выбросу часто предшествует диффузный выброс — быстрое расширение части вспышки. Веерообразный выброс — это существенно более энергичная разновидность возвратного выброса. Он выглядит как очень яркий расширяющийся холм, который неожиданно разрывается и выбрасывает вещество в корону и межпланетное пространство.

Особый класс составляют редко наблюдаемые быстрые выбросы, которые достигают скоростей больше 1000 км/с за несколько минут. Вероятно, они представляют собой компактную часть вспышки, которая выбрасывается без распада на «куски». Вполне возможно, что их наблюдали бы гораздо чаще, если бы не столь высокая их скорость и не столь короткое время жизни.

Строение протуберанцев крайне неоднородно. Об этом, в частности, свидетельствует то обстоятельство, что в линиях различных химических элементов видны их разные части. Следовательно, физические характеристики протуберанцев претерпевают значительные изменения от одной точки к другой. Это в особенности относится к температуре, газовому давлению, движениям вещества и магнитному полю. Плотность вещества протуберанцев гораздо меньше, чем солнечных вспышек, и несколько меньше, чем невозмущенной хромосферы. В этом смысле их можно считать как бы местами разрежения плазмы в хромосфере. Трудно себе представить, каким чудом удерживались бы эти газовые облака над видимой поверхностью Солнца, если бы они не обладали магнитными полями. Хотя напряженность этих полей значительно скромнее, чем в солнечных пятнах, тем не менее она вполне сравнима с напряженностью магнитного поля факельных площадок.

6. Корональные конденсации

В самой внешней части атмосферы Солнца, солнечной короне, располагаются сравнительно менее изученные активные образования — корональные конденсации (рис. 7). Впервые об их существовании стало известно

немногим более 35 лет назад, благодаря внезатменным наблюдениям короны. Это области короны, в которых плотность по крайней мере в несколько раз выше плотности окружающей среды. Именно из-за этого свойства их и называли корональными конденсациями. Они выделяются усиленным свечением зеленой и желтой корональных линий. До недавнего времени считалось, что они совпадают с областями усиленного излучения в далекой ультрафиолетовой и рентгеновской областях

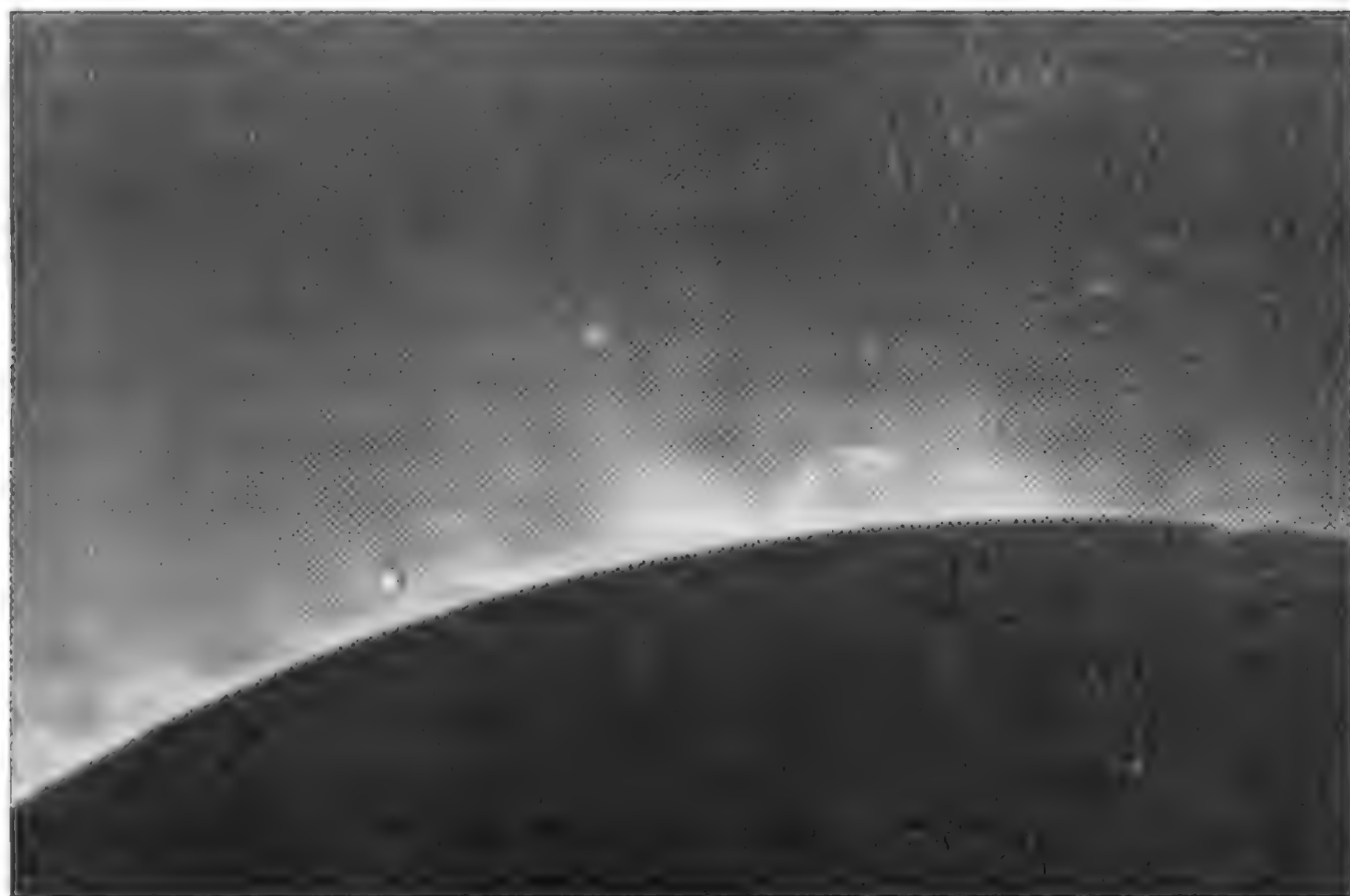


Рис. 7. Корональная конденсация 23 февраля 1972 г. в свете зеленой корональной линии 5303 Å (Горная астрономическая станция АН СССР).

спектра и в радиодиапазоне. Но оказалось, что последние скорее представляют собой только верхний ярус факельных площадок. До настоящего времени получено считанное количество снимков корональных конденсаций даже в зеленой и желтой корональных линиях. Поэтому все основные сведения об этих образованиях, которыми мы сейчас располагаем, «извлечены» из спектров солнечной короны.

Как правило, корональные конденсации располагаются над факельными площадками с группами солнечных пятен. Строение их очень неоднородно. В них обычно выделяют короткоживущую центральную часть, которую называют спорадической конденсацией, или коро-

нальным пузырем, и окружающую ее постоянную конденсацию.

Постоянные корональные конденсации характеризуются в среднем плотностью, превышающей плотность окружающей среды не более чем в 10 раз, температурой 1,5—2,5 млн. градусов и умеренным усилением излучения. Они существуют по крайней мере несколько суток. В свете зеленой корональной линии эти образования выглядят как набор петель и арок, высота которых достигает 100 тыс. км. Размеры корональных конденсаций в значительной степени диктуются размерами связанных с ними групп солнечных пятен. В то же время, чем сильнее свечение конденсаций в зеленой корональной линии, тем выше их «жизненный тонус». В некоторых случаях они оказываются даже более «живучими», чем соответствующие пятна.

Спорадические корональные конденсации гораздо плотнее постоянных и имеют температуру выше 3 млн. градусов. Они связаны с солнечными вспышками и существуют не более нескольких часов. Спорадические конденсации состоят обычно из системы ярких корональных петель. В них усилено свечение желтой и зеленой корональных линий, а также рентгеновских лучей. Эти петли совпадают с петельными протуберанцами, наблюдаемыми в красной водородной линии H_{α} .

При описании корональных конденсаций было бы несправедливо не сказать хотя бы несколько слов о других корональных явлениях, родственных им или хотя бы в какой-то степени связанных с ними. Это прежде всего так называемые корональные транзиенты, которые представляют собой довольно широкий класс сравнительно кратковременных изменений в короне, таких, как внезапное усиление яркости и затухание различных структур, расширяющиеся арки, движущиеся облака и т. п. Многие из них связаны со вспышками и эруптивными протуберанцами. Подобные явления наблюдаются в свете корональных линий, в рентгеновском излучении и в белом свете во время полных солнечных затмений или с космических аппаратов посредством специального инструмента — коронографа с внешним затмением. Помимо петель и арок, в свете корональных линий видны такие быстрые события, как колебания структур, распад арок, восстановление арочных систем, ускоренное расширение арок. В белом свете

регистрируют образование корональных лучей и их расширение, перемещение структур и расширение арок во внутренней короне. Наблюдения с помощью коронографов с внешним затмением позволили обнаружить раздробление лучей и арок и движущиеся наружу со скоростью около 1000 км/с облака плазмы во внешней короне. В рентгеновских лучах замечены яркие корональные точки, имеющие размеры 7—21 тыс. км и среднюю продолжительность существования около 8 часов. По-видимому, такие точки неравномерно распределены по солнечному диску и связаны с маленькими биполярными магнитными областями.

7. Магнитные области

Все явления солнечной активности как бы цементируются солнечными магнитными полями, которые существуют во всех слоях атмосферы Солнца. О них в самых общих чертах мы уже говорили в гл. 1. Естественно, что их напряженность и строение в фотосфере, хромосфере и короне весьма различны. Но сейчас еще рано вникать в эти детали, поскольку данные, полученные к настоящему времени для хромосферы и короны, настолько противоречивы, что вряд ли могут способствовать созданию цельной картины строения и развития магнитных полей на Солнце. Наиболее полно изучены фотосферные магнитные поля. Поэтому мы и ограничимся описанием их особенностей, связанных непосредственно с солнечной активностью.

Как уже отмечалось, основными структурами фотосферного магнитного поля в «королевских зонах» Солнца и даже несколько дальше от экватора являются биполярные и униполярные магнитные области (рис. 8). Биполярные магнитные области, как правило, совпадают с факельными площадками и охватывают участки до 100 тыс. м. д. п. Их полярности обычно соответствуют полярностям магнитного поля пятен групп, расположенных внутри этих факельных площадок. Напряженность поля биполярных магнитных областей изменяется, хотя и слабо, со временем в зависимости от их «возраста» и от уровня солнечной активности.

Униполярные магнитные области, помимо того, что они располагаются ближе к полюсам Солнца, чем биполярные, находятся к востоку от них. Более того, их

полярность совпадает с полярностью хвостовой части биполярных областей соответствующего полушария Солнца. К западу от них и ближе к экватору обнаруживаются так называемые тени (или дýхи) униполярных магнитных областей. Не случайно они получили такое странное название. Ведь напряженность их магнитного

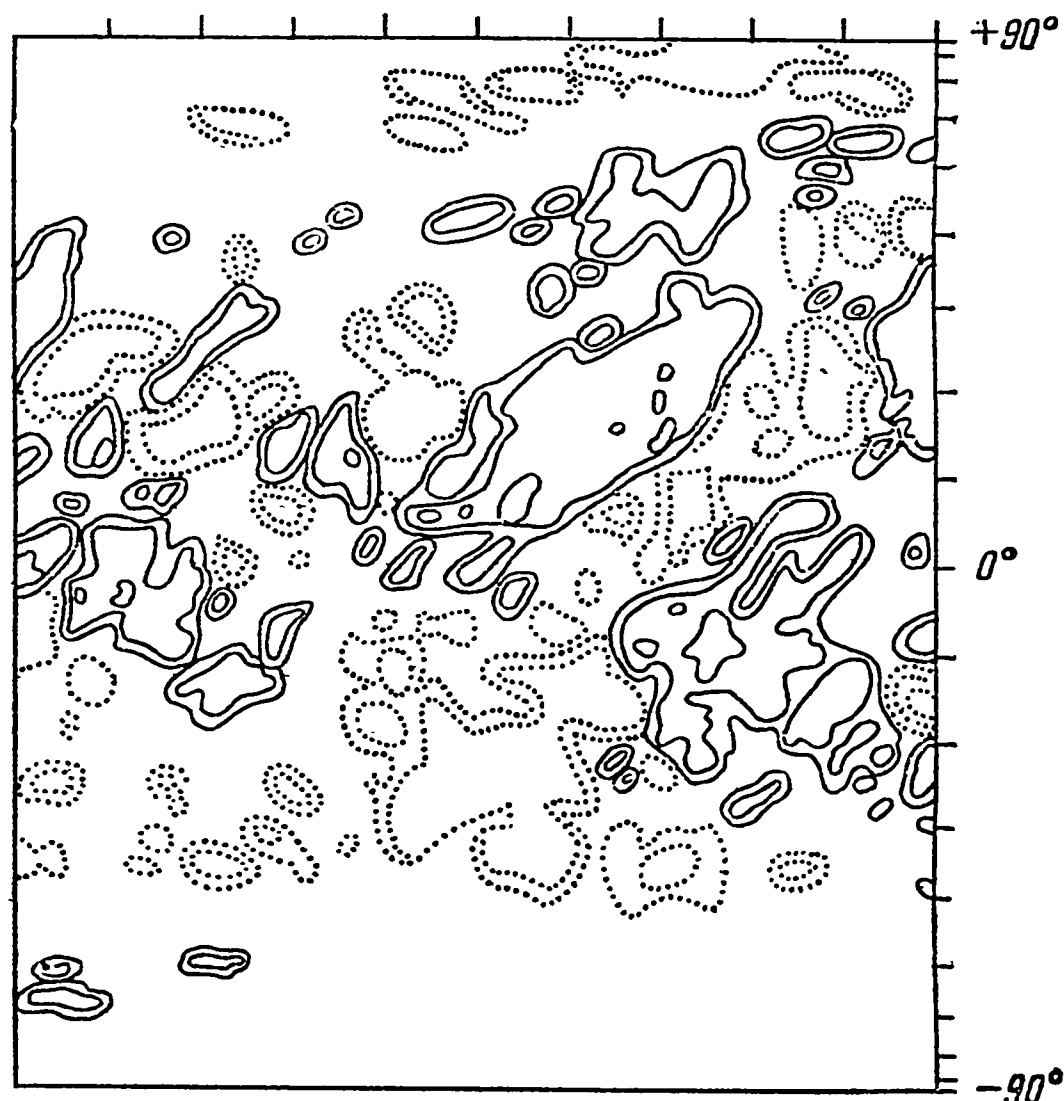


Рис. 8. Униполярные и биполярные области фотосферного магнитного поля Солнца (Обсерватория Маунт Вилсон, США). Сплошная линия — северная магнитная полярность, пунктир — южная.

поля находится почти на пороге «видимости» солнечного магнитографа. Полярность этих теней совпадает с полярностью ведущей части биполярных магнитных областей соответствующего полушария Солнца. Биполярные и униполярные магнитные области постепенно расширяются вдоль оси к западу и востоку со средней скоростью 100—200 м/с, причем к западу значительно быстрее. В этом отношении они очень напоминают группы солнечных пятен. Такой характер расширения магнитных областей подчеркивает их связь с дифференциальным вращением Солнца.

Долгое время среди исследователей нашего дневного светила была широко распространена точка зрения, что

униполярные магнитные области представляют собой лишь «постаревшие», потерявшие свою былую силу биполярные. В этом убеждали и взаимное расположение на видимом солнечном диске и полярность этих областей. Однако сейчас многие считают, что эти два вида областей являются если не всегда, то по крайней мере во многих случаях вполне самостоятельными структурами магнитного поля Солнца. Немаловажным доводом в пользу этого утверждения служит то обстоятельство, что если биполярные магнитные области наиболее многочисленны в годы общего роста солнечной активности, то униполярные — в годы ее спада.

Полярность магнитных полей Солнца, и сильных и слабых, в северном и южном полушариях, как правило, противоположная не только в экваториальных, но и в полярных областях. Она изменяется в противофазе вблизи экватора и у полюсов Солнца. Более подробно с особенностями этого изменения мы познакомимся позднее. А пока важно обратить внимание на то, что примерно с периода максимума солнечной активности и до ее минимума полярность магнитного поля (если судить по ведущей части биполярных магнитных областей и групп солнечных пятен) одинакова по всему полушарию Солнца, тогда как после минимума солнечной активности и до ее следующего максимума она противоположна вблизи экватора и у полюсов.

Увеличение разрешающей способности солнечного магнитографа, позволяющее выделять детали размером 8 тыс. км и меньше, дало возможность получить некоторые новые сведения о строении биполярных и униполярных магнитных областей. Самое интересное и важное из них состоит в том, что новый магнитный поток обычно появляется внутри старой области, и притом не постепенно, а внезапно. Как биполярные, так и униполярные области отличаются очень сложным, запутанным строением, когда весьма затруднительно четко разграничить области противоположной полярности, т. е. в сущности они являются мультиполярными. Как уже говорилось, магнитные детали одной полярности, как правило, склонны к сближению и соединению. Наоборот, детали противоположной магнитной полярности обычно избегают друг друга. Иногда наблюдается даже «выталкивание» площадки одной полярности, когда она окружена областью другой полярности. Наконец, наблюдения

с высоким разрешением привели к наблюдениям так называемых эфемерных областей. Это биполярные магнитные области небольшого размера (меньше 100 м. д. п.) с продолжительностью жизни около одних суток. Они видны также в свете линий ионизованного кальция H и K. Эти магнитные образования появляются на самых различных широтах и долготах Солнца. За день может возникнуть до 100 эфемерных областей. Они, по-видимому, связаны с яркими корональными точками.

8. Корональные дыры

За последние 10 лет усилия многих исследователей солнечной активности были сосредоточены на изучении ранее неизвестного явления в солнечной короне — корональных дыр, особенно интенсивно наблюдавшихся на американской орбитальной станции «Скайлэб». Причина такого исключительного интереса к корональным дырам состояла в том, что, с одной стороны, они очень рельефно оттеняют многие явления солнечной активности и их изменение со временем, а с другой, перекидывают мост от Солнца к межпланетному пространству, в частности, к высокоскоростным потокам в солнечном ветре. Хотя они были открыты при внеатмосферных наблюдениях нашего дневного светила в крайней ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра, оказалось, что их регистрировали и раньше при наблюдении полных солнечных затмений и вне затмения в зеленой и красной корональных линиях, а также в линии гелия $10\,830\text{ \AA}$ и на метровых радиоволнах. Однако на эти образования не обращали особого внимания. Данное обстоятельство помогает в настоящее время комплексному исследованию этого явления и его изменений со временем.

Корональные дыры (рис. 9) видны на солнечном диске как протяженные темные области, простирающиеся от полюса Солнца нередко в противоположное его полушарие, или сравнительно небольшие темные области вблизи экватора. Они отличаются исключительно низкими по сравнению с окружающей корональной средой плотностью и температурой. Обычно эти образования ограничены расходящимися петельными корональными структурами и существуют не менее пяти солнечных обо-

ротов, а в отдельных случаях до полутора лет. Иногда утверждают, что им присуще жесткое, или твердотельное вращение. Однако это мнение разделяют далеко не все исследователи корональных дыр. Корональные дыры формируются, как правило, в областях униполярного магнитного поля, на границах которого размещаются магнитные площадки противоположной полярности, т. е. они обладают расходящейся (или открытой) конфигурацией магнитного поля.

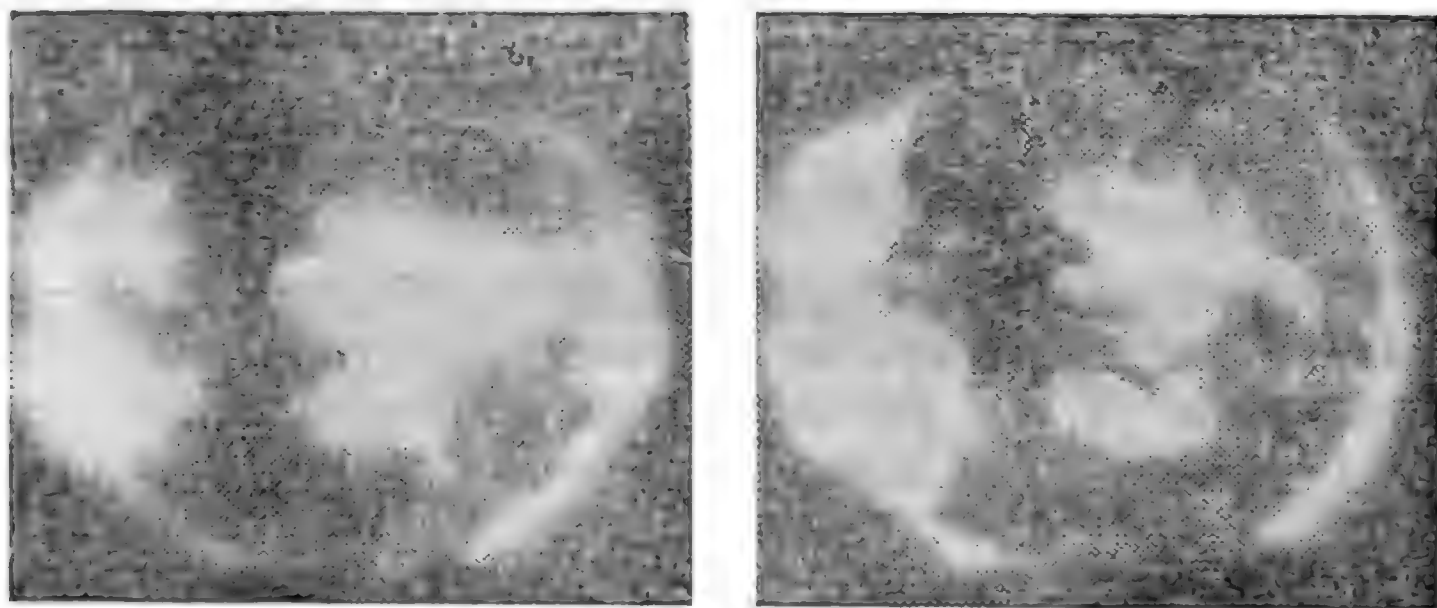


Рис. 9. Корональные дыры по наблюдениям на американской орбитальной станции «Скайлэб».

На основе ракетных наблюдений за 1964—1974 гг. в крайнем ультрафиолетовом и рентгеновском излучениях была выведена более детальная классификация корональных дыр, базирующаяся на природе связанных с ними магнитных полей. Полярные корональные дыры, окружающие полюсы Солнца, связаны с полярными магнитными полями. Они чаще всего наблюдаются вблизи минимума солнечной активности. Затем площадь их уменьшается и к ее максимуму они вовсе исчезают. Высокоширотные корональные дыры появляются обычно, когда полярные поля очень слабы и полярные дыры отсутствуют. Низкоширотные корональные дыры обусловлены, как правило, униполярными магнитными областями и видны после максимума солнечной активности. Экваториальные корональные дыры тоже связаны с униполярными областями, но возникающими между «королевскими зонами» во время максимальной активности, и видны после максимума. Именно они служат источником высокоскоростных потоков солнечной плазмы

(со скоростью больше 500—600 км/с), обнаруженных в солнечном ветре. Детальное их изучение показало, что изменения экваториальных дыр, сводящиеся в основном к смещению их границ, обусловлены преимущественно окружающими их крупномасштабными структурами, в частности, открыванием и замыканием силовых линий магнитного поля, сопровождающимися изменениями интенсивности рентгеновского излучения.

Глава 3

АКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ

1. Понятие активной области

Представьте себе исследователя Солнца, который задался целью раскрыть механизм действия солнечной активности. В его распоряжении многочисленные данные о различных ее явлениях. Но он предпочитает ограничиться изучением только одного из этих явлений и отсюда вывести общие закономерности. Даже если ему удалось бы ухватиться за главное, вряд ли он достигнет своей цели, не обращая внимания на другие явления солнечной активности. И дело здесь в том, что, поступая подобным образом, он руководствуется ложным исходным принципом. Все явления солнечной активности действительно взаимосвязаны и взаимообусловлены, но это отнюдь не говорит о простоте связей, о том, что в солнечной атмосфере процесс обязательно будет во всех случаях проходить в одном определенном направлении. Ведь условия в разных слоях атмосферы Солнца весьма различны. Более того, почти наверняка нельзя найти даже на одном ее уровне двух участков с идеально одинаковыми физическими свойствами. И сами-то связи могут носить многосторонний характер.

Дабы не двигаться на ощупь, подобно исследователю, о котором мы только что говорили, попытаемся подойти к поставленной задаче с другой стороны, хотя и будем исходить из того же основного положения. Если все явления солнечной активности действительно взаимосвязаны, то не лучше ли рассмотреть комплексы этих явлений, локализованные в ограниченных областях атмосферы Солнца? Такое изучение могло бы послужить ключом к решению нашей задачи или, в худшем случае,

сыграть роль перекидного моста для последующего этапа ее решения. Итак, мы не собираемся отказываться от утверждения, что в солнечной активности есть что-то главное, но надо его сначала найти, а не действовать наугад.

Именно такая или подобная ей цепь рассуждений и привела астрономов примерно 50 лет назад к изучению активных областей. Естественно, что на первых порах их определение было довольно узким, а исследование несколько схематичным.

Что же такое активная область? Первоначально считали, что это факельная площадка с группой солнечных пятен и происходящими в ней солнечными вспышками. Тогда думали, что активная область всего лишьместилище активных явлений. Позже, когда астрономы сумели значительно расширить круг известных им активных образований, появилась необходимость в изменении этого определения.

Понятие активной области одновременно отражает две стороны активных явлений на Солнце: их ограниченность в пространстве (в какой-то определенной области солнечной атмосферы) и многостороннюю связь различных солнечных образований, лежащую в основе сложного процесса, охватывающего все слои атмосферы Солнца. Таким образом, активная область — это комплекс разных явлений, происходящих в различных слоях атмосферы Солнца, сосредоточенный в ограниченном объеме пространства. Нет нужды вновь перечислять все активные образования, которые ее составляют. О них достаточно подробно говорилось в предыдущей главе этой книги. Для нас гораздо важнее понять, что же служит основой активных областей.

2. Рождение активных областей

Труднее всего при изучении активных областей Солнца «поймать» момент их рождения. И причина этого не только в быстротечности процесса. Ведь он длится, как правило, всего несколько часов, в крайнем случае немногим более суток. Рождение активной области охватывает все слои солнечной атмосферы и происходит обычно неожиданно. Поэтому изучение его требует больших усилий и не под силу одной астрономической обсерватории, даже если ей повезет с погодой. Вот

почему уже несколько лет исследователи Солнца в разных странах мира совместно трудятся над решением этой интересной и очень важной задачи. И тем не менее пока о том, как происходит рождение активной области, известно совсем мало.

Активные области, как правило, появляются внутри старых магнитных областей как «островки» или рядом с ними в форме «залива». Рождение их начинается всплыванием из-под фотосферы нового магнитного потока. Часто это маленькая биполярная область, выходящая в виде петель магнитных силовых линий. Совершенно неважно, какова полярность старой магнитной области. Появление нового магнитного потока не приводит к ее перестройке. Создается впечатление, что он заранее «уверен», что обязательно «пробьет себе дорогу». Не имеет значения и то, в каком месте «королевских зон» он появился. Развитие полярностей новой биполярной области происходит неравномерно. Чаще сначала развивается хвостовая полярность, а уже затем ведущая.

К сожалению, пока еще не ясно, в какой последовательности происходят события, связанные с рождением активной области, в различных слоях атмосферы Солнца. В частности, не известно точно, какие явления в фотосфере предшествуют или сопутствуют выходу первых петельных магнитных структур в хромосферу. В фотосфере появление нового магнитного потока приводит к образованию на стыке двух или трех супергранул темных дорожек, которые искажают в этом месте привычную форму фотосферных гранул, хотя и на очень короткое время. Через несколько часов вместо них возникают две по́ры противоположной полярности. Здесь же отмечается также увеличение яркости фотосферы в белом свете.

Однако изменения в фотосфере при рождении активных областей выглядят очень скромными по сравнению с явлениями, происходящими почти одновременно в хромосфере. Лучшее всего они заметны в свете фиолетовой линии ионизованного кальция К, а также красной линии водорода H_{α} . Подъем нового магнитного потока в хромосферу дает о себе знать появлением вблизи старой факельной площадки двух маленьких светлых пятнышек — флоккулов, соединенных системой почти параллельных темных дуг — системой арочных волокон.

Иногда в это же время увеличивается яркость отдельных деталей хромосферной сетки, возникают ее новые узлы, особенно на стыке нескольких супергранул. От места возникновения флоккула свечение постепенно распространяется по всей границе одной супергранулы, и флоккул приобретает вид кольца. Со временем это свечение заполняет несколько соседних супергранул. Этот процесс прекращается при появлении пór. И здесь сначала развивается хвостовая часть факельной площадки, а затем уже ведущая.

Через несколько часов после подъема нового магнитного потока в хромосферу в короне появляется одна или несколько ярких полосок, наблюдаемых в рентгеновском излучении. Они расположены поперек линии раздела полярностей продольной составляющей фотосферного магнитного поля и окружены оболочкой из более высоких и слабых петель со сравнительно низкой температурой. Когда полярности в рождающейся активной области разделяются, эти рентгеновские структуры становятся аморфными и теряют свою отчетливость. Примерно тогда же наблюдается усиление излучения в зеленой корональной линии и ослабление его в красной корональной линии, что служит признаком увеличения в этой области плотности плазмы примерно вдвое по сравнению с плотностью невозмущенной короны. Об этом же свидетельствует и рост потока радиоизлучения, начинающийся на сантиметровых волнах иногда даже за сутки до появления факельной площадки. Пока трудно понять сущность такого процесса. Может быть, в будущем более тонкие наблюдения фотосферы помогут в решении этой загадки.

3. Типичная эволюция активной области

Попробуем нарисовать хотя бы схематичную картину жизни наиболее развитой активной области. В какой-то степени ее можно уподобить жизни человека, разделив на четыре стадии развития. Первая стадия, о которой мы уже говорили, может быть названа «детством» активной области. Как можно было убедиться из предшествующего описания, ее скоротечность чаще всего не позволяет нам узнать о ней ничего, кроме того, что она наступила или уже прошла. Многие из активных

областей «умирают» еще в «детстве», не успев обзавестись даже пóрой.

Вслед за «детством» активной области приходит «юность», вторая стадия ее жизни. Этой стадии присуща бурность и неустойчивость развития. Она начинается довольно быстрым увеличением яркости и размеров факельной площадки и корональной конденсации. Вскоре на месте темных дорожек в фотосферных факелах появляются пóры и мелкие пятна. В свете линий ионизованного кальция H и K их возникновению обычно предшествует кратковременное небольшое потемнение факельной площадки в местах появления активных областей. Оформление пятен в группу начинается с ведущей ее части. Хвостовая часть запаздывает со своим возникновением на 2—3 суток. Появление группы пятен ведет к заметному изменению строения магнитного поля факельной площадки. В это время взаимодействие новой магнитной области со старой создает ситуацию, когда отсутствует равновесие магнитных потоков противоположных полярностей факельной площадки и пятен. Если в самой факельной площадке напряженность поля не превышает 1000 Гс, то в пятнах она выше 1500 Гс. Таким образом, появление группы солнечных пятен окончательно дает «добро» на дальнейшее существование факельной площадки в виде биполярной магнитной области, имеющей форму эллипса. К этому времени вокруг границы факельной площадки вытягиваются и удлиняются маленькие темные волоконца, которые лучше всего видны в свете красной линии водорода H_{α} . Изредка даже на этой стадии ранней «юности» эволюций группы пятен происходят слабые солнечные вспышки.

Дальнейшее развитие активной области во многом зависит от «жизненного тонуса», который магнитное поле «заложило» в группу солнечных пятен. Окончательно оформившись в «зрелые» пятна, обладающие полутенью, главные пятна группы продолжают расти за счет многочисленных мелких пятен и пóр, располагающихся между ними. Постепенно они все больше раздвигаются вдоль оси группы к западу и востоку. Напряженность магнитного поля их возрастает, иногда достигая 3—4 тыс. Гс. При этом магнитная структура группы пятен и всей факельной площадки сильно усложняется. Вблизи границы раздела полярностей продольной со-

ставляющей ее магнитного поля возникают новые поля. Иногда образуется «залив» одной полярности внутри другой. Примерно через 5—7 дней после появления (а иногда и раньше) группа солнечных пятен набирает полную силу. И именно тогда ее «спокойную» жизнь нарушают недолговечные протуберанцы и солнечные вспышки, в том числе сильные. Они приводят к значительным изменениям в структуре группы пятен, нередко «непоправимым». В это же время появляется спорадическая корональная конденсация. А факельная площадка и постоянная корональная конденсация все еще продолжают увеличивать свою яркость и расширяются.

После периода максимального развития появляются первые признаки «увядания» группы солнечных пятен. Сначала исчезают мелкие пятна и поры в центральной ее части, затем дробится на «куски» хвостовое пятно и, наконец, сохраняется только ведущее пятно группы. Обычно оно самое живучее и порой может просуществовать даже несколько месяцев. Практически одновременно с группой пятен исчезает и постоянная корональная конденсация. Факельная площадка становится не столь яркой, хотя все еще расширяется. Зато волокна, которые раньше были небольшими и недолговечными и располагались почти перпендикулярно к экватору Солнца, теперь становятся значительно большими и устойчивыми, причем угол их наклона к экватору постепенно уменьшается.

В это время сильно упрощается строение магнитного поля факельной площадки. Образуются два хвоста, имеющих полярность, характерную для тыловой ее части; эти хвосты направлены к востоку от ее центра, и вся область приобретает характерную треугольную форму. Постепенно граница между противоположными полярностями магнитной области становится все более четкой. При этом влияние дифференциального вращения Солнца особенно сильно сказывается на форме магнитной области и соответствующей ей факельной площадки. Тогда же начинает уменьшаться и напряженность ее поля.

И вот тут наступает третья стадия жизни активной области, которую можно было бы назвать стадией «зрелости». Основной ее особенностью является устойчивость. Факельная площадка пока еще сравнительно яркая, но уже не та, что в былые времена. Размер ее

продолжает расти, но это уже «не к добру». Она становится несколько «рыхлее», чем в пору своей «юности». Зато волокно, «напитавшись соками» породившей его факельной площадки, выглядит значительно внушительнее. Теперь оно длинное и довольно толстое и тянется почти вдоль параллели, тем самым наглядно демонстрируя свою устойчивость. Проходит примерно три месяца и факельная площадка, потеряв свою яркость и значительно сократившись в размерах, исчезает. Остается только волокно и существенно ослабевшая магнитная область, пока еще биполярная.

Так начинается четвертая, последняя стадия в жизни активной области — ее «старость». Эта стадия тоже длится не менее трех месяцев, если не больше. Волокно постепенно дробится на части, уменьшается в размерах и исчезает. А магнитная область все еще держится, хотя только в редких случаях ей удается сохранить свою биполярность дольше одного месяца. При этом напряженность ее поля едва отличима от напряженности поля окружающей среды. Затем один из ее полюсов настолько ослабевает, что магнитную область начинают принимать за униполярную. Проходит еще какое-то время и она как бы растворяется в окружающей среде.

Вот, пожалуй, и все, что можно рассказать в самых общих чертах о жизни активной области в том идеальном случае, когда ей удалось «развернуться» в полную силу. Обычно она существует 6—8 месяцев, а в исключительных случаях до полутора лет. Как мы уже отмечали, весьма трудно определить, какое из явлений солнечной активности обуславливает то или иное развитие активной области. Скорее можно заметить многостороннюю связь этих явлений и даже многостороннюю направленность всего процесса. В большей степени это в общем не относится лишь к магнитному полю активной области, которое выглядит наиболее устойчивым и как будто бы развивается в одном направлении. Поэтому вполне вероятно, что магнитное поле служит основой активной области. Однако имеются веские основания предполагать, что магнитные поля сами обусловлены крупномасштабными движениями вещества или по крайней мере, не являются единственной причиной наблюдаемых активных процессов.

Наиболее подробно изучены вторая и третья стадии эволюции активных областей. Это вполне понятно, по-

скольку как раз в это время происходит развитие и разрушение факельных площадок, которые гораздо лучше доступны наблюдениям, чем магнитные области. Именно факельные площадки или, точнее, кальциевые флоккулы, позволяют достаточно надежно выделять границы активных областей. Иногда эти две стадии называют «флоккульной» или «факельной» фазой их развития. Характерной особенностью всей истории активной области, в частности, и на ее «флоккульной» фазе, является быстрое ее развитие и гораздо более медленное разрушение. Это свойство обнаруживается буквально во всех ее явлениях от фотосферы до короны, в том числе и в наиболее бурном процессе образования солнечных вспышек. Бóльшая часть энергии выделяется активной областью вблизи времени ее максимального развития, т. е. через 6—11 суток после ее рождения.

4. Типы активных областей и их вспышечная активность

Детальное изучение «флоккульной» фазы развития активных областей показало, что они не менее разнообразны, чем явления, которые в них происходят. Интереснее всего, что картина развития активной области, описанная в предыдущем разделе, встречается очень редко. Значит, наиболее развитую область отнюдь нельзя считать типичной. Столкнувшись с таким результатом, исследователям солнечной активности не оставалось ничего лучшего, как попытаться разбить все известные им активные области на типы (или классы) по каким-то наиболее важным их признакам с тем, чтобы узнать, какую же активную область следует считать типичной. Такая классификация может базироваться на одном из двух исходных принципов. Первый из них состоит в фиксации особенностей активной области в какой-то определенный момент, независимо от того, что происходило с нею раньше и что произойдет в дальнейшем. Его применение дает так называемую статическую классификацию. Второй, наоборот, учитывает полную картину развития активной области, не уделяя внимания отдельным моментам ее эволюции. Он приводит к построению динамической классификации. Статическая и динамическая классификация активных областей взаимно допол-

няют друг друга и тем самым позволяют получить ответ на поставленный здесь вопрос.

Самая полная и наиболее обоснованная статическая классификация активных областей построена по признаку особенностей строения их магнитных полей. Как читатель, возможно, помнит, магнитные области на Солнце обычно бывают биполярными и униполярными. На этом основании все активные области разбиваются на три основных типа: униполярные (A), биполярные (B) и множественные биполярные (BB). Униполярные области представляют собой, в сущности, остатки старых биполярных. Простая биполярная область характеризуется двумя четко разделенными магнитными полюсами. Множественная биполярная область состоит из двух и более смежных простых биполярных и на этом основании может быть названа мультиполярной. Детализация этой классификации исходит из более тонкой магнитной структуры активных областей.

Если район одной из полярностей биполярной магнитной области окружен магнитным полем противоположной полярности, то ее относят к классу BC . Такая ситуация часто встречается при рождении новой магнитной области внутри старой. Области с одним или несколькими «островами» противоположной полярности в ведущей и хвостовой частях составляют класс BS , а с «заливом» одной полярности, простирающимся внутрь противоположной,— класс BY . Комбинации $BC—BS$ и $BY—BS$ в биполярных областях дают классы BCS и BYS .

Множественные биполярные активные области самого простого класса BB состоят из двух смежных биполярных магнитных областей, которые не разделены столь ясно, как соответствующие им факельные площадки. Если они содержат три (или более) смежных активных области, то их относят к классу BBB . Области BB с характеристиками C , Y и S дают класс BBC . Если две смежные биполярные магнитные области разделены так же, как соответствующие им факельные площадки, и включают характеристики C , Y или S , то они составляют класс BCB .

К особому классу Si относят активные области с необычным для данного полушария Солнца расположением магнитных полярностей. Наконец, учитывая несовершенство любой самой совершенной классификации,

выделяют класс X , в который входят все области, которые не удалось отнести ни к одному из перечисленных классов активных областей.

Наиболее многочисленными оказались классы A , B и BC . Если учесть, что первый из них отражает «старость», а последний «детство» активной области, естественно сделать вывод, что самыми типичными являются простые биполярные активные области. Что же касается сложных (классов BS , BY , BYS и BCS) и различных множественных биполярных областей, то все они составляют не более 29% от общего числа. При этом сложные биполярные области встречаются почти вдвое реже множественных. И особенно редко наблюдаются активные области класса Si .

Динамическая классификация активных областей базируется на продолжительности их жизни и вспышечной активности, а также на «живучести» их групп солнечных пятен. Поскольку полное время их жизни определить удастся далеко не всегда, вместо него обычно используют длительность «флоккульной» фазы. Основанием для допустимости такой замены служит то, что продолжительность существования всех активных областей после исчезновения в них факельных площадок практически одинакова, а начальная их стадия слишком коротка, чтобы принимать ее во внимание при измерении времени в синодических оборотах Солнца.

Согласно этой классификации, по продолжительности их «флоккульной» фазы (T) активные области делятся на три типа: короткоживущие ($T = 1 - 2$ оборота Солнца), типичные ($T = 3$ оборота) и долгоживущие ($T > 3$ оборотов). Дальнейшее подразделение на классы производится по характеристикам их вспышечной активности. Короткоживущие активные области делятся на области без вспышек (Sn) и со вспышками (Sf). Поскольку в них, как правило, вспышечная активность слаба (субвспышки и вспышки балла 1), дальнейшего деления этого типа на классы не требуется. Типичные активные области бывают трех классов: без вспышек (Tn), со слабыми вспышками (Tf) и со вспышками балла 2 и выше (Tgf). Долгоживущие активные области делятся также на три класса: со слабыми вспышками (Lf), со вспышками балла 2 и выше (Lgf) и с так называемыми рекуррентными группами пятен (которые живут дольше одного оборота Солнца) и с сильными

вспышками (*Lrgf*). Этот тип всегда отличается вспышечной активностью, которая наиболее «выразительна» в рекуррентных группах пятен. В них особенно «любят» появляться протонные вспышки. Таким образом, «жизненный тонус» активных областей определяется прежде всего вспышечной активностью и «мощностью» групп солнечных пятен, которые в них наблюдаются. Они как бы вливают новые силы в области, в которые они входят.

Активные области с продолжительностью «флоккульной» фазы 3 оборота Солнца (около 80 земных суток) не случайно названы типичными. Действительно, чаще

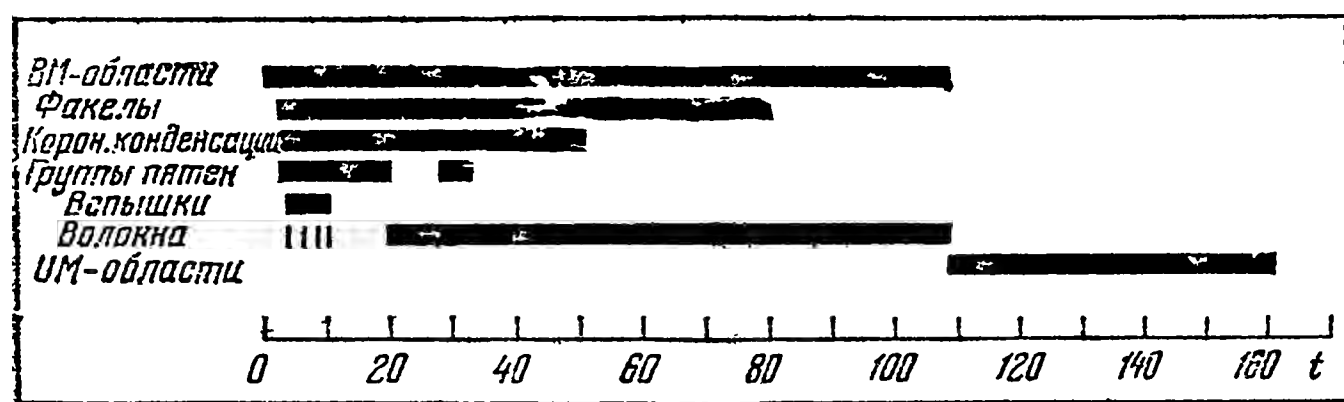


Рис. 10. Схема развития основных составляющих типичной активной области.

всего они отличаются именно такой «живучестью», которой соответствуют, между прочим, и другие их средние характеристики. На рис. 10 показана схема развития их основных составляющих со временем.

Подавляющее большинство активных областей располагается в «королевских зонах». Однако в те годы, когда уровень солнечной активности особенно высок, они порой появляются и на широтах выше 40° . Такие высокоширотные области сравнительно менее устойчивы. На первый взгляд может показаться, что только этим они и отличаются от своих «сестер» из «королевских зон». Но, оказывается, у них имеется еще одно принципиальное отличие. Если скорость вращения обычных активных областей, располагающихся на сравнительно низких широтах, в общем больше, чем скорость вращения фотосферы Солнца, то высокоширотные области вращаются с той же скоростью, что и фотосфера. Отсюда можно прийти к заключению, что высокоширотные активные области располагаются ближе к видимой поверхности Солнца, чем области «королевских зон».

Хотя устойчивость активных областей в основном определяется их внутренними свойствами, в особенности строением их магнитного поля и связанной с ним вспышечной активностью, немаловажную роль играет их взаимодействие с окружающей солнечной плазмой. Мы могли в этом убедиться уже из сравнения устойчивости высокоширотных и низкоширотных областей. Но еще очевиднее такой вывод следует из сравнения долготного распределения короткоживущих и долгоживущих активных областей. Если у первых оно является практически однородным, то вторые чаще всего располагаются в «излюбленных» долготных интервалах — активных долготях, о которых подробно будет говориться в главе 5. А пока любопытно заметить, что в тех же активных долготях возникает большинство протонных вспышек и рекуррентных (т. е. повторяющихся) групп пятен. Таким образом, устойчивость наиболее развитых активных областей в немалой степени определяется местом солнечной атмосферы, в котором они возникли.

5. О физической природе развития активной области

Целью изучения активной области является построение ее физической теории. Но пока такая теория еще не создана. И дело здесь не только в том, что в самой общей картине развития активной области остается пока немало белых пятен. Составляющие ее явления столь разнообразны и противоречивы, что привести их в единую систему до сих пор не удалось. Мы будем говорить только о фрагментах физической схемы развития активной области, созданных к настоящему времени. Надеемся, что в дальнейшем изложении читателя не удивит довольно большое количество «если» и «по-видимому». Это неизбежное следствие наших всегда несовершенных, хотя и увеличивающихся возможностей.

Ранее уже говорилось о том, что магнитные поля и крупномасштабные движения солнечной плазмы лежат в основе рождения и эволюции активной области. Поэтому все наше рассмотрение будет иметь магнитогидродинамический характер. Солнечные магнитные поля существуют в условиях очень высокой электропроводности. Это позволяет обсудить наиболее важные для нас вопросы в рамках магнитной гидродинамики с бесконечной проводимостью. Прежде чем перейти непосред-

ственно к вопросам физической картины эволюции активной области, напомним, что если в подфотосферных слоях Солнца вещество «контролирует» движение магнитного поля, то в фотосфере кинетическая и магнитная энергии сравнимы между собой, а в хромосфере и короне магнитное поле «управляет» движением солнечной плазмы.

Как мы уже знаем, появление биполярной магнитной области на уровне фотосферы обусловлено всплыванием из подфотосферных слоев Солнца нового магнитного потока. В среднем он составляет 10^{22} Мкс. Этот поток выносится конвекцией в магнитных жгутах. Пока жгут находится глубоко в конвективной зоне, магнитное давление мало по сравнению с газовым и поэтому заметно не сказывается. Но когда конвекция выносит часть его в верхние слои этой зоны, где газовое давление ниже, жгут получает возможность расширяться, становится легче окружающей среды и всплывает. Теперь поднимающиеся магнитные силовые линии, выйдя в солнечную фотосферу, уже не встретят большого сопротивления и разойдутся по большой области. Они увлекают за собой газ, находящийся внутри жгута. Магнитное поле не препятствует движению вещества вдоль его силовых линий. Поэтому поднимающийся газ будет соскальзывать вдоль них. При расширении магнитных жгутов их напряженности равны нескольким сотням гаусс.

Наклон оси активной области (и ее биполярной магнитной области) к экватору Солнца обусловлен силой Кориолиса (учитывающей влияние переносного движения). На магнитный поток, пересекающий фотосферу, влияют конвективные или волновые движения. Так называемые случайные горизонтальные блуждания в сочетании с дифференциальным вращением Солнца, по-видимому, являются причиной расширения, вытягивания и ослабления «зрелых» биполярных магнитных областей и появления униполярных областей. Появление наиболее развитых активных областей в «излюбленных» долготных интервалах, скорее всего, связано с тем, что их источник расположен в глубоких слоях конвективной зоны, которые вращаются как твердое тело. Но простого и ясного объяснения этой особенности еще нет.

При выходе в солнечную фотосферу магнитный поток распределяется по площади нескольких супергранул за несколько суток, т. е. за время в несколько раз пре-

вышающее продолжительность их существования. Фотосферные магнитные поля со средней напряженностью 200 Гс слишком слабы, чтобы уменьшить конвекцию. Но они в состоянии способствовать усилению звуковых и гидромагнитных волн вблизи фотосферы, увеличивая нелучистый поток примерно в 10 раз. Этим можно объяснить важный и интересный факт более медленного убывания с высотой температуры в факельных площадках по сравнению с невозмущенной фотосферой.

Появление солнечных пятен, характеризующихся малыми величинами температуры, лучистого потока и давления по сравнению с окружающей их солнечной атмосферой, обусловлено «подавлением» конвективного переноса энергии магнитным полем напряженностью около 5000 Гс. Согласно современным представлениям, этот дефицит становится ничтожно малым на глубине примерно 1000 км. Пятна формируются, по-видимому, супергрануляцией, которая концентрирует магнитный поток в вершинах супергранул. Именно в этих местах намагниченное вещество в верхней части конвективной зоны охлаждается путем потери энергии через излучение, пока ослабление конвекции не уравновесит эти потери. Таким образом, создается впечатление, что солнечные пятна не выносятся снизу, а образуются в верхней части конвективной зоны супергрануляционным движением. В этом смысле они выступают как вторичное явление по отношению к биполярной магнитной области. Время жизни групп пятен в значительной степени тоже «диктуется» действием супергрануляции, которая «вольна» раздробить магнитный поток на мелкие части. Тонкую структуру пятен и появление вокруг них ярких, более горячих областей можно объяснить действием так называемой колебательной конвекции, которую не способно подавить даже сильное магнитное поле. Этот тип конвекции представляет собой движение газа вдоль магнитных силовых линий, которые в случае сильного поля можно считать неподвижными. В соседних магнитных трубках движение происходит не в одной фазе, так что энергия переносится вверх как бы шагами, пока не выйдет наружу. Имеются и другие объяснения особенностей возникновения и развития групп пятен, быть может, даже лучшие, чем приведенные здесь. Но они не столь полные. Вот почему мы предпочли здесь ограничиться этим,

Над солнечной фотосферой магнитное поле в активных областях является бессильным, т. е. любые значительные электрические токи, которые в состоянии изменить магнитное поле, текут вдоль него. Видимо, именно поэтому в солнечной хромосфере в свете красной линии водорода H_{α} наблюдают многочисленные вытянутые структуры. Несколько труднее объяснить с помощью этого типа магнитного поля корональные детали. Но в последнее время появились просветы и в этом вопросе, по крайней мере в отношении крупномасштабных корональных структур.

Самым сложным и вместе с тем наиболее интересным в построении физической схемы развития активной области, безусловно, является объяснение явления солнечной вспышки. Чем больше исследователи Солнца бьются над решением этой проблемы, тем больше возникает в ней новых вопросов. Поэтому было бы легкомысленным с нашей стороны изложить здесь даже самые главные (и притом нередко противоречивые) результаты попыток построить теорию солнечных вспышек. Вместо этого, как и для групп пятен, мы ограничимся описанием одной концепции, оговорившись при этом, что время покажет, насколько можно считать ее основательной.

Основной задачей теории солнечных вспышек является объяснение источника их энергии и того, как эта энергия передается быстрым частицам. Обычно считается, что главным источником солнечных вспышек является сильное магнитное поле. Хотя имеются два типа моделей вспышек, в одном из которых магнитное поле играет пассивную роль, а в другом активную, мы остановимся на описании моделей второго типа, поскольку в настоящее время нет надежных свидетельств накопления энергии перед вспышкой в иных формах, чем магнитное поле. Наиболее полно такая модель разработана С. И. Сыроватским и его сотрудниками. Нередко ее называют моделью нейтрального токового слоя.

В этой модели деформация первоначального магнитного поля активной области, вызываемая, например, движением пятен группы, приводит к появлению областей сильного электрического тока в плазме, так называемых токовых слоев. Такой слой обычно возникает вблизи линии раздела полярностей магнитного поля, или нейтральной его линии. Развитие токового слоя ав-

томатически ведет к его турбулентности, т. е. хаотическим движениям разного масштаба, и следовательно, к быстрому рассеянию (или диссипации) магнитного поля. Турбулентность плазмы в токовом слое может быть причиной нагрева ее до высокой температуры, появления рентгеновского и нетеплового радиоизлучения, а также ускорения некоторых заряженных частиц до высоких энергий. Кроме того, теплопроводность вдоль

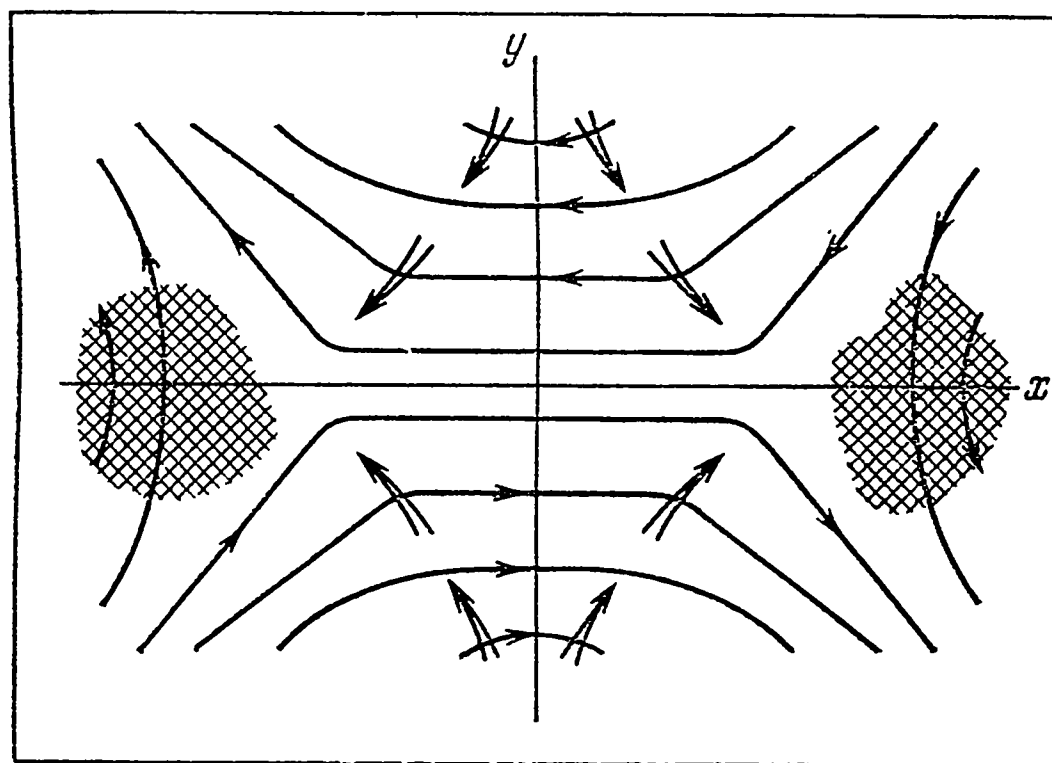


Рис. 11. Схема развития горизонтального токового слоя (по С. И. Сыроватскому). Заштрихованные участки — места уплотнения солнечной плазмы.

магнитных силовых линий в состоянии привести к нагреву соседних, более холодных элементов, прежде всего водорода.

Развитие горизонтального токового слоя вблизи нейтральной (или нулевой) линии магнитного поля ведет к появлению на его краях двух волокон плотной плазмы, параллельных этой линии и расположенных по обе стороны от нее. Это происходит в результате «выдавливания» плазмы из области вблизи нейтральной линии, как показано на рис. 11. Такая двухленточная структура, как мы уже знаем, действительно типична для протонных вспышек. После сжатия плазмы происходит ее разрежение около нулевой линии и движение наружу со скоростью, соответствующей напряженности магнитного поля активной области. Тогда же возникает разрыв токового слоя или какой-либо его части. Вследствие прерывания тока появляется сильное электрическое

поле, которое помогает понять ускорение большого числа частиц до высоких энергий в течение короткой импульсной стадии вспышки.

Таким образом, горячие электроны во время тепловой стадии вспышки и нетепловые электроны, ускоренные до высоких энергий во время ее импульсной стадии, вдоль магнитных силовых линий проникают в более плотную область вне токового слоя. Они нагревают внешний слой этой области до высоких температур, вызывая при этом рентгеновское излучение и излучение в линиях видимой области спектра (в частности, водородных) в более глубоких слоях солнечной атмосферы. Главная часть магнитной энергии, которая накапливается в области вспышки, рассеивается в течение ее импульсной стадии, когда эту область пополняют ускоренные частицы. Отсюда можно сделать вывод, что вспышка, по-видимому, может рассматриваться прежде всего как явление ускорения частиц, а излучения в оптическом, рентгеновском и радиодиапазонах спектра скорее представляют собой вторичные процессы, обусловленные этими частицами.

Происхождение протуберанцев (особенно спокойных) связано либо с «вытягиванием» газа из хромосферы, либо, что более вероятно, с охлаждением солнечной короны. Стоит температуре короны уменьшиться в 2—3 раза, как наступает тепловая неустойчивость и дальнейшее охлаждение идет самопроизвольно. В охлажденном газе давление падает. Поэтому окружающая корона будет его сжимать. В конце концов образуется холодное плотное облако с давлением, равным внешнему. Известно, что спокойные протуберанцы обычно располагаются либо на линии раздела полярностей магнитного поля в активной области, либо на ее высокоширотной границе, где магнитные силовые линии, выйдя из области, становятся горизонтальными и затем опять поворачивают вниз. Создается впечатление, что протуберанцы «висят» на вершинах арок магнитных силовых линий, прогибая их своим весом. Под влиянием дифференциального вращения Солнца они затем поворачиваются. Это обстоятельство, а также наличие собственного, хотя и небольшого, магнитного поля протуберанцев при высокой их проводимости увеличивает их устойчивость и обеспечивает им «долгую жизнь». Другие типы протуберанцев (выбросы, петлеобразные протуберанцы)

тоже развиваются в соответствии с конфигурацией их внутреннего и внешнего магнитного поля. Конечно, имеются большие трудности в объяснении всего многообразия протуберанцев. Поэтому здесь мы ограничимся только самым грубым и простым объяснением наиболее общих их свойств. Появление во время вспышек активной области спорадических корональных конденсаций, связанных с образованием в короне петлеобразных протуберанцев, скорее всего вызвано давлением магнитного поля, проникающего в корону, и охлаждением сжатого газа.

Повышенный нагрев превращает в «дно» короны верхний, более плотный слой хромосферы. В этом убеждают результаты сопоставления оптических и радионаблюдений Солнца, которые дают распределение температуры по высоте над факельной площадкой. Оказывается, что над хромосферой температура в активной области выше 2 млн. градусов и, уменьшаясь с высотой, тем не менее превосходит среднюю температуру короны. Отсюда следует, что энергия волн, идущая от факельной площадки, поглощается в самых нижних слоях короны и в верхней хромосфере, а дальше передается теплопроводностью вдоль магнитных силовых линий. Систематические изменения, которые испытывают отношения интенсивностей различных корональных и крайних ультрафиолетовых линий в постоянных корональных конденсациях, невозможно объяснить, если не считать их неоднородными. Форма этих конденсаций, безусловно, определяется структурой магнитных полей короны и их эволюцией.

Глава 4

ЦИКЛИЧНОСТЬ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

1. Индексы солнечной активности

Для количественного изучения любого явления природы нужны какие-то характеристики, которые помогли бы нам разглядеть его сущность. Но характеристики характеристикам рознь. Одно дело, когда они имеют определенный физический смысл, и совсем другое — когда они сами еще нуждаются в расшифровке. На заре изучения солнечной активности, в середине прошлого

столетия, была введена первая такая характеристика для солнечных пятен — относительные числа солнечных пятен. Теперь их чаще называют числами Вольфа по фамилии придумавшего их швейцарского астронома Р. Вольфа. Это не просто общее число пятен на солнечном диске, а характеристика, которая одновременно отражает и число групп пятен и строение каждой из них. Числа Вольфа равны сумме удесятеренного числа групп пятен и общего числа пятен во всех группах. Поскольку обычно мы видим только одну полусферу Солнца, эти числа определяются не для всего Солнца, а для видимого его полушария.

Каков же физический смысл этого параметра? На подобный вопрос ответить очень трудно. Одно время склонялись к мнению, что числа Вольфа характеризуют ультрафиолетовую радиацию Солнца. Но если это и так, то только в некоторой степени. В самом деле, что бы вы ответили, если бы вас спросили, каков физический смысл, скажем, числа облаков в земной атмосфере? Вряд ли кто-либо рискнул бы назвать эту характеристику показателем осадков или влажности.

Для нашей планеты мы располагаем физическими характеристиками атмосферы за многие десятилетия. А вот с Солнцем все получается гораздо сложнее. Даже числа Вольфа определены примерно за 240 лет. (В дальнейшем мы увидим, что для Солнца это очень небольшой период.) Поэтому мы так дорожим относительными числами пятен, хотя вполне отдаем себе отчет в несовершенстве этой характеристики.

Но мало того, что мы, по существу, не знаем физического смысла чисел Вольфа. Само их определение сопряжено с рядом особенностей чисто субъективного характера. Индивидуальный подход к выделению групп пятен и подсчету отдельных ядер, объединенных общей полутенью, а также неодинаковые возможности различных инструментов и различных наблюдателей — все это не может не внести ошибок в определение относительных чисел пятен. Пожалуй, лишь скрупулезная работа цюрихских наблюдателей Солнца позволила сохранить столь длинный и сравнительно однородный ряд чисел Вольфа, к которому ныне «привязываются» ряды всех других обсерваторий.

Для приведения относительных чисел пятен к цюрихской системе их умножают на так называемый пе-

реводный коэффициент, в котором учитываются все уже упоминавшиеся различия в их определении. К сожалению, строго говоря, такой прием нельзя считать вполне законным, поскольку нередко происходят скачки в системе определения чисел Вольфа не только одной обсерватории, но даже одного наблюдателя, и притом неожиданно. Вот почему в статистических исследованиях солнечной активности предпочитают использовать лишь цюрихский ряд относительных чисел пятен. Небезынтересно, что сама цюрихская система еще во второй половине прошлого века подверглась ревизии: в ней стали иначе подсчитывать ядра и учитывать при помощи «веса» коэффициента размеры групп пятен. В связи с этим определенное в Цюрихе значение числа Вольфа всегда умножено на коэффициент 0,6.

Характеристики различных активных образований на Солнце называют индексами или показателями солнечной активности. Пока мы познакомились только с наиболее древним из них — числом Вольфа. К настоящему времени таких индексов существует более десятка. Вряд ли есть смысл перечислять все, тем более, что только некоторые из них понадобятся нам в дальнейшем изложении. Поэтому мы остановимся лишь на наиболее существенных и особо рассмотрим вопрос об общих чертах различных индексов солнечной активности.

Для групп солнечных пятен широко применяются индексы суммарной площади пятен и максимальной напряженности их магнитных полей. Первый из них определяется сложением площадей всех групп пятен на видимом солнечном диске. Эта характеристика пятен значительно выигрывает по сравнению с числами Вольфа в смысле объективности и надежности ее определения. Но физический смысл суммарной площади тоже туманен. Не так давно ее считали характеристикой корпускулярного излучения Солнца, но вряд ли это полностью соответствует действительности. По крайней мере нынешние прямые измерения корпускулярного излучения с космических ракет не говорят в пользу этого утверждения.

В какой-то степени суммарная площадь пятен дает представление о суммарном уровне напряженности магнитных полей на Солнце, или об их магнитном потоке. Дело в том, что существует сравнительно тесная связь между площадью пятен и напряженностью их магнит-

ного поля. Поэтому такое заключение кажется естественным.

Но все же напряженность магнитного поля — пока единственный индекс для этого активного образования, который имеет вполне ясный физический смысл. И хотя определение ее все еще несовершенно, тем не менее это обстоятельство нельзя сбрасывать со счета. Будущее за этим индексом, и даже сейчас площадь пятен не может заменить его.

Если суммарные площади пятен регулярно определялись около ста лет в Гринвичской астрономической обсерватории (с 1874 по 1976 г.), то индексы солнечных вспышек появились совсем недавно. Первоначально основной их характеристикой служило общее число вспышек за сутки безотносительно к их мощности. Со временем стало ясно, что такой индекс очень несовершенен. Тогда сначала решили суммировать произведение их балла на продолжительность существования, а затем при суммировании учитывать их мощность, умножая число вспышек определенного балла на соответствующий коэффициент. Так появился вспышечный индекс солнечной активности. Эта характеристика напоминает числа Вольфа. Но, в отличие от них, на ее определении сильно сказываются погодные условия на всех обсерваториях, ведущих наблюдения вспышек. Ведь, строго говоря, для точного вычисления вспышечного индекса требуется 24 часа непрерывных наблюдений вспышек, тогда как для подсчета чисел Вольфа достаточно одного наблюдения фотосферы за сутки на любой из обсерваторий. Таким образом, вспышечный индекс может быть определен только приближенно, даже если экстраполировать тем или иным способом число вспышек за интервалы времени, которые не удалось охватить наблюдениями. Считают, что этот индекс характеризует интенсивность ультрафиолетового, а возможно, даже рентгеновского излучения. Однако наблюдения рентгеновских вспышек показали, что это далеко не соответствует действительности. Поэтому иногда используют специальный вспышечный индекс для рентгеновских вспышек, который строится по тому же принципу, что и обычный.

Особый интерес к протонным вспышкам привел к созданию обобщенного индекса вспышек, который определяет каждую вспышку суммой баллов, характеризую-

щих ультрафиолетовое ее излучение по внезапным ионосферным возмущениям, излучение в красной линии водорода H_{α} и радиоизлучение в сантиметровом и метровом диапазонах. Этот индекс изменяется в пределах от 0 до 17. Когда его значение превышает 10, вспышка оказывается сильной практически во всем диапазоне электромагнитных волн.

В течение продолжительного времени использовался индекс суммарной площади протуберанцев. Хотя эта характеристика в свое время сыграла немаловажную роль в изучении солнечной активности, теперь ее применяют только в тех случаях, когда хотят получить какое-то дополнительное подтверждение той или иной особенности ее изменения со временем. Как и другие подобные индексы, суммарная площадь протуберанцев не имеет определенного физического смысла. Более того, она охватывает только часть протуберанцев. Это преимущественно спокойные протуберанцы, которые во время наблюдений хромосферы в красной водородной линии H_{α} видны на краю солнечного диска. Что же касается эруптивных и активных протуберанцев, то их жизнь слишком коротка для того, чтобы зарегистрировать эти образования, наблюдая Солнце один раз в сутки. Поэтому большая часть их теряется. Кроме того, суммарная площадь протуберанцев не учитывает того обстоятельства, что яркость протуберанцев весьма различна. Впрочем, все эти рассуждения раньше в расчет не принимались, тем более, что этот индекс был одним из немногих, которыми располагали исследователи Солнца в то время.

Одновременно с суммарной площадью пятен определялась и суммарная площадь фотосферных факелов. Конечно, она в каком-то смысле напоминает индекс суммарной площади протуберанцев, поскольку определяется только для областей вблизи восточного и западного краев солнечного диска. Но в последнее время ею вновь заинтересовались в связи с созданием комплексных индексов активности фотосферы Солнца.

Когда появилась возможность регулярных наблюдений зеленой и красной корональных линий, был введен еще один индекс солнечной активности, имеющий определенный физический смысл, — средняя интенсивность зеленой (или красной) корональной линии. Этот индекс получают путем измерения интенсивности той или дру-

гой линии через каждые 5° лимба на расстоянии $40''$ от него и вычисления среднего из этих величин за каждый день наблюдений. Так как корональные наблюдения практически никогда не охватывают больше 20 дней в месяц, усреднение обычно производят за интервал времени не меньше шести месяцев. Однако и такое усреднение не может устранить неточностей, возникающих из-за частых разрывов в наблюдениях. В последние годы этот недостаток в какой-то мере пытаются преодолеть, объединяя корональные данные нескольких обсерваторий в одной системе. Но такая операция затрудняется тем обстоятельством, что различные обсерватории определяют интенсивность корональных линий разными методами и в разных единицах измерения.

В течение последних 25—30 лет среди индексов солнечной активности довольно прочное место занял индекс потока радиоизлучения Солнца. Этот индекс определяется для разных длин волн, от метров до сантиметров. Особенно популярен индекс потока радиоизлучения Солнца на волне 10,7 см (частота 2800 МГц). В последнее время им даже пытались заменить числа Вольфа, ссылаясь на очень тесную связь значений этих двух индексов. Во всяком случае возможность практически ежедневного надежного его определения независимо от погодных условий и вполне определенный физический смысл делают в настоящее время этот индекс весьма привлекательной характеристикой солнечной активности. А с точки зрения некоторых исследователей он просто незаменим. Единственным, хотя и весьма существенным, недостатком потока радиоизлучения является большое различие его абсолютных определений разными обсерваториями. Но если нас интересует только ход изменения, то это обстоятельство не столь существенно. Коль скоро у нас есть возможность определять индекс каждый день, достаточно данных и одной обсерватории. Что же касается утверждения о равнозначности индексов потока радиоизлучения Солнца на волне 10,7 см и чисел Вольфа, то, как показывает детальный анализ, оно не соответствует истинному положению вещей.

Мы подробно изложили достоинства и недостатки всех перечисленных индексов солнечной активности с тем, чтобы легче было представить себе, за какие интервалы времени нужно делать усреднение для получе-

ния уверенных суждений о характере изменения со временем тех или иных явлений активности Солнца.

Очевидно, что только усреднение за год может дать надежные результаты. Правда, для некоторых индексов (таких, как относительные числа и суммарная площадь солнечных пятен) допустимы усреднения за месяц, но далеко не для всех задач изучения солнечной цикличности это полезно. Помимо основных, или исходных индексов активности иногда применяются и производные. Мы не будем занимать время их рассмотрением, тем более что нередко их построение сводится к чисто формальным математическим действиям, физический смысл которых далеко не всегда достаточно ясен.

Гораздо важнее отметить то обстоятельство, что многие индексы солнечной активности очень сложны. Они включают в себя сразу две или даже несколько особенностей того или иного активного образования. Попробуем, например, с этой точки зрения взглянуть на относительные числа солнечных пятен и их суммарную площадь. Мы уже знаем, что числа Вольфа определяются как числом групп, так и числом пятен, входящих в них. Таким образом, их величина, во-первых, зависит от того, сколько групп пятен появляется на солнечном диске, во-вторых, она обусловлена строением групп, т. е. их «живучестью». Если исходить из этой точки зрения, то число Вольфа определяется числом появившихся групп пятен и продолжительностью их жизни. В какой-то мере то же самое можно сказать и о суммарной площади пятен, которая в неявной форме включает в себя и число групп. Ведь суммирование площади производится по всем группам. Что же касается средней или максимальной площади группы пятен, то она в значительной степени определяет время существования группы.

Число групп пятен или других активных образований, появившихся на Солнце, или новообразований обычно называют их частотой. В то же время, поскольку продолжительность явления обусловлена прежде всего его мощностью, в какой-то степени ее условно можно называть мощностью. Если внимательно рассмотреть те или иные индексы солнечной активности с этой точки зрения, то можно убедиться в том, что даже самые простые из них следует отнести либо к частоте, либо к мощности явления. Например, максимальная напряженность магнитного поля групп пятен и интенсивность

зеленой корональной линии являются индексами мощности, тогда как индекс числа солнечных вспышек в его первоначальном виде является индексом частоты. Нынешний вспышечный индекс и индекс суммарной площади протуберанцев, подобно числам Вольфа, можно разложить на исходные составляющие: частоту и мощность. Запомним это обстоятельство, поскольку оно оказывается (как мы увидим в дальнейшем) очень важным для понимания некоторых особенностей солнечной цикличности.

Теперь, когда мы получили достаточно ясное представление о том, что такое индексы солнечной активности и какова связь между ними, можно перейти к изложению основной части этой главы, в которой рассматриваются главные свойства солнечной цикличности.

2. 11-летний цикл солнечной активности

В середине прошлого столетия астроном-любитель Г. Швабе и Р. Вольф впервые установили факт изменения числа солнечных пятен со временем, причем средний период этого изменения составляет 11 лет. Об этом можно прочесть почти во всех популярных книжках о Солнце. Но мало кто даже из специалистов слышал о том, что еще в 1775 г. П. Горребов из Копенгагена дерзнул утверждать, что существует периодичность солнечных пятен. К сожалению, ряд его наблюдений был слишком мал, чтобы установить продолжительность этого периода. Высокий научный авторитет противников точки зрения Горребова и артиллерийский обстрел Копенгагена, уничтоживший все его материалы, сделали все для того, чтобы об этом утверждении забыли и не вспоминали даже тогда, когда оно было доказано другими.

Конечно, все это нисколько не умаляет научных заслуг Вольфа, который ввел индекс относительных чисел солнечных пятен и сумел по различным материалам наблюдений астрономов-любителей и профессионалов восстановить его с 1749 г. Более того, Вольф определил годы максимальных и минимальных чисел пятен еще со времени наблюдений Г. Галилея, т. е. с 1610. Это и позволило ему упрочить весьма несовершенную работу Швабе, располагавшего наблюдениями только за 17 лет, и впервые определить продолжительность сред-

него периода изменения числа солнечных пятен. Так появился знаменитый закон Швабе — Вольфа, согласно которому изменения солнечной активности происходят периодически, причем длина среднего периода составляет 11,1 года (рис. 12). Конечно, в то время говорилось только об относительном числе солнечных пятен. Но со

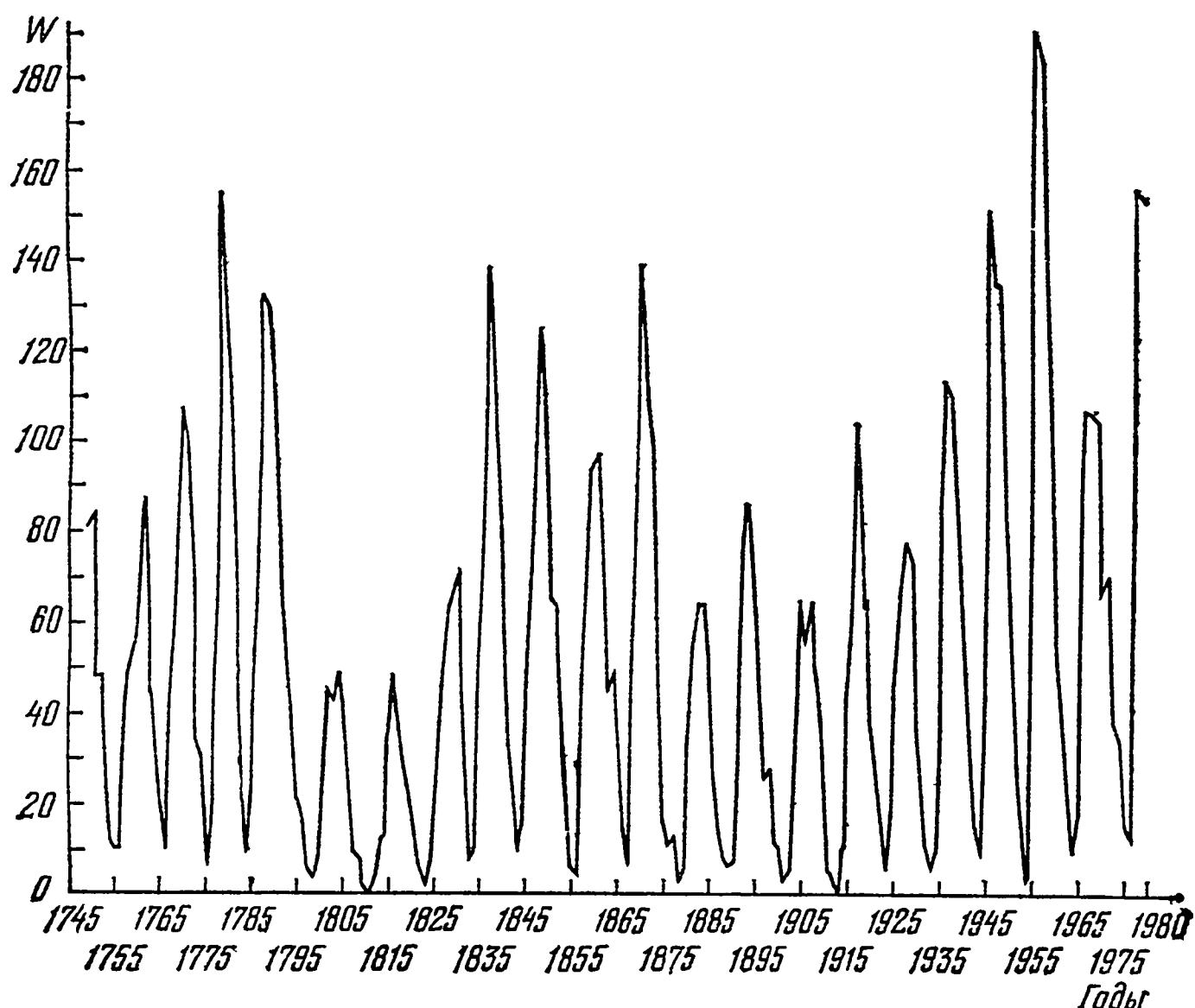


Рис. 12. Кривая среднегодовых цюрихских относительных чисел солнечных пятен за 1755—1980 годы.

временем этот вывод был подтвержден для всех известных индексов солнечной активности. Многочисленные иные периоды активных солнечных явлений, особенно более короткие, которые были обнаружены исследователями Солнца за прошедшие 100 с лишним лет, неизменно опровергались, и только 11-летний период всегда оставался незыблемым.

Хотя изменения солнечной активности происходят периодически, эта периодичность особая. Дело в том, что интервалы времени между годами максимальных (или минимальных) чисел Вольфа довольно сильно различаются. Известно, что с 1749 г. до наших дней продолжительность их колебалась от 7 до 17 лет между годами максимумов и от 9 до 14 лет между годами ми-

нимумов относительного числа солнечных пятен. Поэтому правильнее будет говорить не об 11-летнем периоде, а об 11-летнем цикле (т. е. периоде с возмущениями, или «скрытом» периоде) солнечной активности. Этот цикл имеет исключительно важное значение как для проникновения в сущность солнечной активности, так и для изучения солнечно-земных связей.

Но 11-летний цикл проявляется не только в изменении частоты солнечных новообразований, в частности, солнечных пятен. Его можно обнаружить также по изменению со временем широты групп пятен (рис. 13). Это обстоятельство привлекло внимание известного английского исследователя Солнца Р. Кэррингтона еще в 1859 г. Он обнаружил, что в начале 11-летнего цикла пятна обычно появляются на высоких широтах, в среднем на расстоянии $\pm 25\text{—}30^\circ$ от экватора Солнца, тогда как в конце цикла предпочитают участки ближе к экватору, в среднем на широтах $\pm 5\text{—}10^\circ$. Позже это гораздо убедительнее показал немецкий ученый Г. Шперер. Сначала этой особенности не придавали особого значения. Но потом положение резко изменилось. Оказалось, что среднюю продолжительность 11-летнего цикла можно определить гораздо точнее по изменению широты групп солнечных пятен, чем по вариациям чисел Вольфа. Поэтому ныне закон Шперера, который свидетельствует об изменении широты групп пятен с ходом 11-летнего цикла, наряду с законом Швабе — Вольфа выступает как основной закон солнечной цикличности. Все дальнейшие работы в этом направлении только уточняли детали и по-разному объясняли эту вариацию. Но они, тем не менее, оставили неизменной формулировку закона Шперера.

Теперь мы обратимся к 11-летнему циклу солнечной активности, который в течение сотни с лишним лет со времени его открытия неизменно находился в центре внимания исследователей Солнца. За его кажущейся поразительной простотой на самом деле скрывается столь сложный и многогранный процесс, что мы всегда стоим перед опасностью потерять все или по крайней мере многое из того, что он перед нами уже раскрыл. Прав был один из наиболее известных специалистов по прогнозам солнечной активности немецкий астроном В. Глайсберг, когда в одной из своих популярных статей сказал следующее: «Сколько раз исследователям

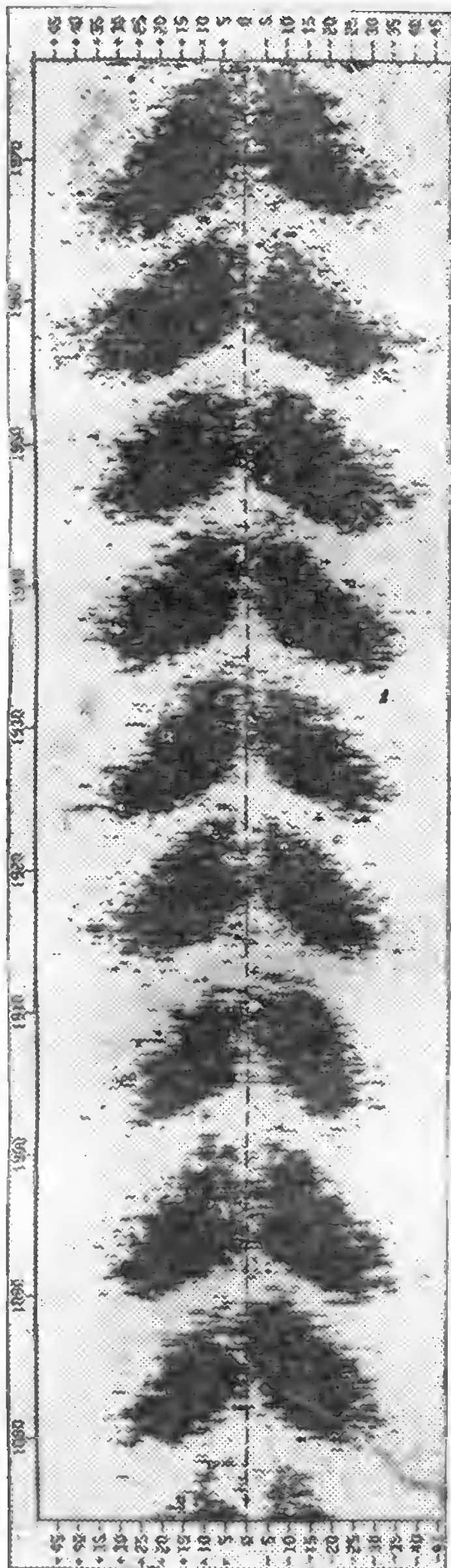


Рис. 13. Диаграмма «бабочек» групп солнечных пятен (по Гринвичу).

солнечной активности казалось, что наконец-то им удалось окончательно установить все основные закономерности 11-летнего цикла. Но вот наступал новый цикл, и уже первые его шаги начисто отбрасывали всю их уверенность и заставляли заново пересматривать то, что они считали окончательно установленным». Может быть, в этих словах немного сгущены краски, но суть их, безусловно, верна, особенно когда речь идет о прогнозе солнечной активности.

Как мы уже говорили, в определенные годы числа Вольфа имеют максимальную или минимальную величину. Эти годы или еще более точно определенные моменты времени, например, кварталы или месяцы, называют соответственно эпохами максимума и минимума 11-летнего цикла, или, более обще, эпохами экстремумов. Среднемесячные и среднеквартальные значения относительных чисел пятен, помимо в общем регулярного, плавного изменения, характеризуются очень неправильными, сравнительно кратковременными флуктуациями (см. раздел 5 этой главы). Поэтому обычно эпохи экстремумов выделяют по так называемым сглаженным среднемесячным числам Вольфа, которые представляют собой усредненные особым способом за 13 месяцев величины этого индекса, полученного из наблюдений, или по верхней и нижней огибающим кривых изменения среднеквартальных значений относительных чисел пятен. Но иногда применение таких методов может привести к ложным результатам, особенно в низких циклах, т. е. циклах с небольшим максимальным числом Вольфа. Интервал времени от эпохи минимума до эпохи максимума 11-летнего цикла получил название ветви роста, а от эпохи максимума до эпохи следующего минимума — ветви его спада (рис. 14).

Продолжительность 11-летнего цикла по эпохам минимума определяется гораздо лучше, чем по эпохам максимума. Но и в этом случае возникает затруднение, которое заключается в том, что следующий цикл, как правило, начинается раньше, чем заканчивается предыдущий. Теперь мы научились различать группы пятен нового и старого циклов по полярности их магнитного поля. Но такая возможность появилась немногим более 60 лет назад. Поэтому ради сохранения однородности методики приходится довольствоваться все-таки не истинной длиной 11-летнего цикла, а неким ее «эрзацем»,

определяемым по эпохам минимальных чисел Вольфа. Вполне естественно, что в этих числах обычно объединены группы пятен нового и старого 11-летних циклов.

11-летние циклы солнечных пятен отличаются не только различной длиной, но и различной их интенсивностью, т. е. разными значениями максимальных чисел Вольфа. Мы уже говорили о том, что регулярные данные о среднемесячных относительных числах пятен цюрихского ряда имеются с 1749 г. Поэтому первым цюрихским 11-летним циклом считают цикл, начавшийся в 1775 г. Предшествующий же ему цикл, содержащий неполные данные, видимо, по этой причине получил нулевой номер. Если за прошедшие со времени начала регулярного определения чисел Вольфа 22 цикла (включая нулевой и еще не закончившийся, но уже прошедший свой максимум текущий) максимальное

среднегодовое число Вольфа в среднем равнялось 106, то в различных 11-летних циклах оно испытывало колебание от 46 до 190. Особенно высоким был закончившийся в 1964 г. 19-й цикл. В его максимуме, который наступил в конце 1957 г., среднеквартальное число Вольфа равнялось 235. Второе место вслед за ним занимает нынешний, 21-й цикл, максимум которого прошел в конце 1979 г. со среднеквартальным относительным числом солнечных пятен 182. Самые низкие циклы солнечных пятен относятся к началу прошлого столетия. Один из них, 5-й по цюрихской нумерации, самый продолжительный из наблюдавшихся 11-летних циклов. Некоторые исследователи солнечной активности даже сомневаются в реальности его продолжительности и считают, что она полностью обязана «деятельности» на поприще науки Наполеона I. Дело в том, что всецело поглощенный ведением победоносных войн французский император мобилизовал в армию почти всех астрономов обсерваторий Франции и покоренных им стран. Поэтому в те годы наблюдения Солнца велись

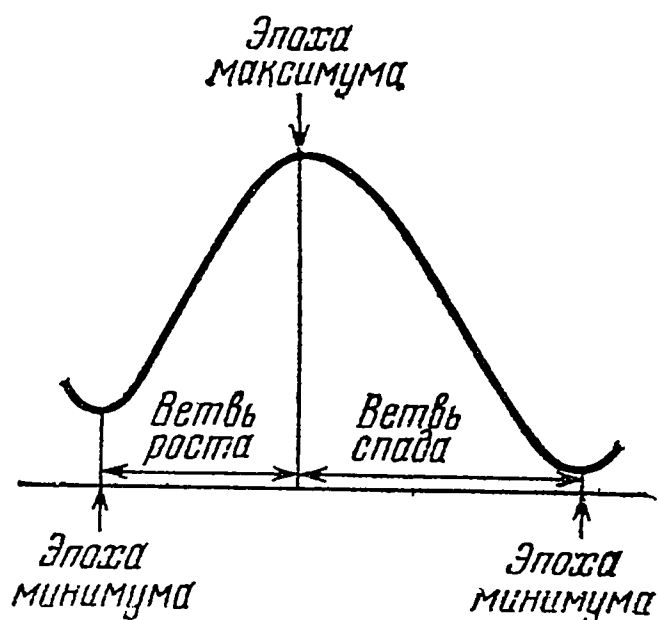


Рис. 14. Схема кривой 11-летнего цикла солнечной активности.

максимальное среднегодовое число Вольфа в среднем равнялось 106, то в различных 11-летних циклах оно испытывало колебание от 46 до 190. Особенно высоким был закончившийся в 1964 г. 19-й цикл. В его максимуме, который наступил в конце 1957 г., среднеквартальное число Вольфа равнялось 235. Второе место вслед за ним занимает нынешний, 21-й цикл, максимум которого прошел в конце 1979 г. со среднеквартальным относительным числом солнечных пятен 182. Самые низкие циклы солнечных пятен относятся к началу прошлого столетия. Один из них, 5-й по цюрихской нумерации, самый продолжительный из наблюдавшихся 11-летних циклов. Некоторые исследователи солнечной активности даже сомневаются в реальности его продолжительности и считают, что она полностью обязана «деятельности» на поприще науки Наполеона I. Дело в том, что всецело поглощенный ведением победоносных войн французский император мобилизовал в армию почти всех астрономов обсерваторий Франции и покоренных им стран. Поэтому в те годы наблюдения Солнца велись

столь редко (не более нескольких дней за месяц), что вряд ли можно доверять полученным тогда числам Вольфа. Трудно сказать, насколько основательны подобные сомнения. Кстати, косвенные данные о солнечной активности за это время не противоречат выводу о низком уровне относительных чисел солнечных пятен в начале XIX в. Однако просто так эти сомнения отбросить тоже нельзя, поскольку они позволяют избавиться от некоторых исключений, в особенности для отдельных 11-летних циклов. Любопытно, что второй самый низкий цикл, максимум которого относится к 1816 г., имел длину всего 12 лет, в отличие от своего предшественника.

Поскольку мы располагаем данными за двести с лишним лет только о числах Вольфа, все основные свойства 11-летних циклов солнечной активности выведены именно для этого индекса. С легкой руки мастигоного первооткрывателя 11-летнего цикла более пятидесяти лет исследователи солнечной активности были заняты главным образом поисками полного набора циклов продолжительностью от нескольких месяцев до сотни лет. Р. Вольф, убежденный в том, что солнечная цикличность — плод воздействия на Солнце планет Солнечной системы, сам положил начало этим поискам. Однако все эти работы дали гораздо больше для развития математики, чем для изучения солнечной активности. Наконец, уже в 40-х годах нынешнего столетия, один из «наследников» Вольфа по Цюриху М. Вальдмайер осмелился усомниться в правоте своего «научного прадеда» и перенес причину 11-летней цикличности внутрь самого Солнца. Именно с этого времени собственно и началось настоящее исследование главных внутренних свойств 11-летнего цикла солнечных пятен.

Интенсивность 11-летнего цикла довольно тесно связана с его длительностью. Чем мощнее этот цикл, т. е. чем больше его максимальное относительное число пятен, тем меньше его продолжительность. К сожалению, эта особенность носит скорее чисто качественный характер. Она не позволяет достаточно надежно определить значение одной из этих характеристик, если известна вторая. Гораздо увереннее выглядят результаты изучения связи максимального числа Вольфа (точнее, его десятичного логарифма) с длиной ветви роста 11-летнего цикла, т. е. той частью кривой, которая ха-

рактизует нарастание чисел Вольфа от начала цикла до его максимума. Чем больше максимальное число солнечных пятен в этом цикле, тем короче ветвь его роста. Таким образом, форма циклической кривой 11-летнего цикла в значительной степени определяется его высотой. У высоких циклов она отличается большой асимметрией, причем длина ветви роста всегда короче длины ветви спада и равна 2—3 годам. У сравнительно слабых циклов эта кривая почти симметрична. И лишь самые слабые 11-летние циклы вновь показывают асимметрию, только противоположного типа: у них ветвь роста длиннее ветви спада.

В противоположность длине ветви роста, длина ветви спада 11-летнего цикла тем больше, чем выше его максимальное число Вольфа. Но если предыдущая связь очень тесная, то эта гораздо слабее. Вероятно, именно поэтому максимальное относительное число пятен только качественно определяет продолжительность 11-летнего цикла. Вообще ветвь роста и ветвь спада основного цикла солнечной активности во многих отношениях ведут себя по-разному. Начать хотя бы с того, что если на ветви роста сумма среднегодовых чисел Вольфа почти не зависит от высоты цикла, то на ветви спада она определяется именно этой характеристикой. Не удивительно, что столь неудачными были попытки представить кривую 11-летнего цикла математическим выражением не с двумя, а с одним параметром. На ветви роста многие связи оказываются гораздо более четкими, чем на ветви спада. Создается впечатление, что именно особенности усиления солнечной активности в самом начале 11-летнего цикла диктуют его характер, тогда как его поведение после максимума в общем примерно одинаково во всех 11-летних циклах и различается только вследствие разной длины ветви спада. Впрочем, скоро мы увидим, что это первое впечатление нуждается в одном важном дополнении.

Свидетельства в пользу определяющего значения ветви роста 11-летнего цикла дали исследования циклических изменений суммарной площади солнечных пятен. Выяснилось, что по длине ветви роста можно достаточно надежно установить максимальное значение суммарной площади пятен. Ранее уже говорилось о том, что в этот индекс в неявной форме включено число групп пятен. Вполне естественно поэтому, что для него

мы получаем, в сущности, те же выводы, что и для чисел Вольфа. Гораздо хуже известны закономерности 11-летнего цикла для частоты других явлений солнечной активности, в частности, солнечных вспышек. Чисто качественно можно полагать, что для них они окажутся такими же, как для относительных чисел и суммарной площади солнечных пятен.

До сих пор мы имели дело с явлениями солнечной активности любой мощности. Но, как мы уже знаем, явления на Солнце очень сильно отличаются по своей интенсивности. Даже в обыденной жизни вряд ли кто поставит на одну доску легкое перистое облачко и большую черную тучу. А пока мы поступали именно так. И вот что любопытно. Стоит только разделить активные солнечные образования по их мощности, как мы приходим к довольно разноречивым результатам. Явления слабой или средней интенсивности в общем дают ту же кривую 11-летнего цикла, что и числа Вольфа. Это относится не только к числу пятен, но и к числу факельных площадок, и к числу солнечных вспышек. Что же касается наиболее мощных активных образований на Солнце, то они чаще всего встречаются не в саму эпоху максимума 11-летнего цикла, а через 1—2 года после нее, а иногда и до этой эпохи. Таким образом, для этих явлений циклическая кривая либо становится двухвершинной, либо сдвигает свой максимум на более поздние по отношению к числам Вольфа годы. Именно таким образом ведут себя самые большие и яркие группы солнечных пятен, самые большие и яркие кальциевые флоккулы, протонные вспышки, всплески радиоизлучения IV типа. Аналогичную форму имеют кривые 11-летнего цикла для интенсивности зеленой корональной линии, потока радиоизлучения на метровых волнах, средней напряженности магнитных полей и средней продолжительности жизни групп солнечных пятен, т. е. индексов мощности явлений.

Наиболее своеобразно проявляется 11-летний цикл в законе Шперера для различных процессов солнечной активности. Как мы уже знаем, для групп солнечных пятен он выражается в изменении в среднем широты их появления от начала к концу цикла. При этом по мере развития цикла скорость такого «сползания» зоны солнечных пятен к экватору постепенно уменьшается и через 1—2 года после эпохи максимума чисел Вольфа

оно вовсе прекращается, когда зона достигает «барьера» в интервале широт $7^{\circ},5-12^{\circ},5$. Дальше происходят только колебания зоны вокруг этой средней широты. Создается впечатление, что 11-летний цикл «работает» только до этого времени, а затем постепенно как бы «рассасывается». Известно, что пятна охватывают довольно широкие зоны по обе стороны от экватора Солнца. Ширина этих зон тоже изменяется с течением 11-летнего цикла. Они самые узкие в начале цикла и самые широкие в эпоху его максимума. Именно этим объясняется то обстоятельство, что в наиболее мощных циклах, таких, как 18-й, 19-й и 21-й цюрихской нумерации, самые высокоширотные группы пятен наблюдались не в начале цикла, а в годы максимума. Группы пятен малых и средних размеров располагаются практически по всей ширине «королевских зон», но предпочитают концентрироваться к их центру, положение которого все приближается к экватору Солнца по мере развития цикла. Наиболее крупные группы пятен «облюбовали» края этих зон и только изредка «снисходят» к внутренним их частям. Если судить только по расположению этих групп, то можно подумать, что закон Шперера является лишь статистической фикцией. Подобным же образом ведут себя и солнечные вспышки разной мощности.

На ветви спада 11-летнего цикла средняя широта групп солнечных пятен, начиная с $\pm 12^{\circ}$, не зависит от высоты цикла. В то же время в год максимума она определяется максимальным числом Вольфа в этом цикле. Более того, чем мощнее 11-летний цикл, тем на более высоких широтах появляются его первые группы пятен. В то же время широты групп в конце цикла, как мы уже видели, в сущности, в среднем одинаковы безотносительно к тому, какова его мощность.

Северное и южное полушария Солнца проявляют себя весьма по-разному в отношении развития в них 11-летних циклов. К сожалению, числа Вольфа определялись только для всего солнечного диска. Поэтому мы располагаем по данному вопросу довольно скромным материалом Гринвичской обсерватории о числе и площадях групп пятен примерно за сто лет. Но все же гринвичские данные позволили выяснить, что роль северного и южного полушарий заметно изменяется от одного 11-летнего цикла к другому. Это выражается не

только в том, что во многих циклах одно из полушарий определенно выступает в роли «дирижера», но и в различии формы циклической кривой этих полушарий в одном и том же 11-летнем цикле. Такие же свойства были обнаружены и по числу групп солнечных пятен и по их суммарным площадям. Более того, нередко эпохи максимума цикла в северном и южном полушариях Солнца отличаются на 1—2 года. Подробнее об этих различиях мы будем говорить при рассмотрении продолжительных циклов. А пока в качестве примера вспомним лишь, что в самом высоком 19-м цикле солнечная активность определенно преобладала в северном полушарии Солнца. При этом эпоха максимума в южном полушарии наступила на два с лишним года раньше, чем в северном.

До сих пор мы рассматривали особенности развития 11-летнего цикла солнечной активности только для явлений, происходящих в «королевских зонах» Солнца. На более высоких широтах этот цикл, по-видимому, начинается раньше. В частности, давно уже было известно, что увеличение числа и площади протуберанцев в интервале широт $\pm 30—60^\circ$ происходит примерно за год до начала 11-летнего цикла пятен и низкоширотных протуберанцев. Любопытно, что если в «королевских зонах» средняя широта появления протуберанцев с ходом цикла постепенно уменьшается, подобно тому, как это происходит с группами солнечных пятен, то более высокоширотные протуберанцы имеют в начале цикла в среднем меньшую широту, чем в его конце. Нечто подобное наблюдается и у корональных конденсаций. Некоторые исследователи считают, что для зеленой корональной линии 11-летний цикл начинается примерно на 4 года раньше, чем для групп пятен. Но сейчас еще трудно сказать, насколько надежен этот вывод. Не исключено, что на самом деле на Солнце постоянно сохраняется высокоширотная зона корональной активности, которая с учетом данных, полученных для более низких широт, и приводит к такому кажущемуся результату.

Еще необычнее ведут себя слабые магнитные поля вблизи его полюсов. Они достигают минимальной величины напряженности примерно в годы максимума 11-летнего цикла и в это же время полярность поля меняется на противоположную. Что же касается эпохи

минимума, то в этот период напряженность полей довольно значительна и полярность их остается неизменной. Любопытно, что изменение полярности поля вблизи северного и южного полюсов происходит не одновременно, а с разрывом в 1—2 года, т. е. все это время полярные области Солнца обладают одинаковой полярностью магнитного поля.

Число полярных факелов изменяется параллельно с величиной напряженности поля вблизи полюсов Солнца в каждом его полушарии (между прочим, предваряя практически такое же изменение чисел Вольфа примерно через 4 года). Поэтому, хотя мы располагаем данными о слабых полярных магнитных полях менее чем за три 11-летних цикла, результаты наблюдений полярных факельных площадок позволяют сделать вполне определенный вывод относительно их циклических изменений. Таким образом, магнитные поля и факельные площадки в полярных областях Солнца отличаются тем, что их 11-летний цикл начинается в максимуме 11-летнего цикла солнечных пятен и достигает максимума вблизи эпохи минимума пятен. Будущее покажет, насколько надежен этот результат. Но нам кажется, что если не вникать в детали, вряд ли последующие наблюдения приведут к существенному его изменению. Любопытно, что полярные корональные дыры отличаются точно таким же характером 11-летней вариации.

Хотя солнечная постоянная, как уже говорилось, не испытывает ощутимых колебаний с ходом 11-летнего цикла, это отнюдь не означает, что подобным образом ведут себя и отдельные области спектра излучения Солнца. В этом читатель уже мог убедиться, когда рассматривались потоки радиоизлучения Солнца. Несколько слабее изменения интенсивности фиолетовых линий ионизованного кальция H и K. Но и эти линии в эпоху максимума примерно на 40% ярче, чем в эпоху минимума 11-летнего цикла. Имеются данные, хотя и не совсем бесспорные, об изменении с ходом цикла глубины линий в видимой области солнечного спектра. Однако самые внушительные вариации излучения Солнца относятся к рентгеновскому и дальнему ультрафиолетовому диапазонам длин волн, возможность изучения которых дали искусственные спутники Земли и космические аппараты. Оказалось, что интенсивность рентгеновского излучения в интервалах длин волн 0—8 Å,

8—20 Å и 44—60 Å от минимума к максимуму 11-летнего цикла возрастает в 500, 200 и 25 раз. Не менее ощутимые изменения происходят и в спектральных областях 203—335 Å и вблизи 1216 Å (в 5,1 и 2 раза).

Как было обнаружено с помощью современных математических методов, существует так называемая тонкая структура 11-летнего цикла солнечной активности. Она сводится к устойчивому «ядру» вокруг эпохи максимума, охватывающему примерно 6 лет, двум или трем вторичным максимумам и расщеплению цикла на две составляющие со средними периодами около 10 и 12 лет. Такая тонкая структура выявляется и в форме циклической кривой чисел Вольфа, и в «диаграмме бабочек». В частности, в самых высоких 11-летних циклах, кроме основной зоны солнечных пятен, имеется также высокоширотная зона, которая сохраняется только до эпохи максимума и смещается с ходом цикла не к экватору, а к полюсу. Кроме того, «диаграмма бабочек» для групп пятен представляет собой не единое целое, а как бы складывается из так называемых цепочек-импульсов. Суть этого процесса состоит в том, что, появляясь на сравнительно высокой широте, группа пятен (или несколько групп) за 14—16 месяцев смещается к экватору Солнца. Такие цепочки-импульсы особенно хорошо заметны на ветви роста и ветви спада 11-летнего цикла. Возможно, они связаны с флуктуациями солнечной активности.

Советский исследователь Солнца А. И. Оль установил еще одно фундаментальное свойство 11-летнего цикла солнечной активности. Изучая связь между индексом рекуррентной геомагнитной активности за последние четыре года цикла и максимальным числом Вольфа, он обнаружил, что она очень тесная, если число Вольфа относится к следующему 11-летнему циклу, и совсем слабая, если оно относится к тому же циклу, что и индекс геомагнитной активности. Отсюда следует, что 11-летний цикл солнечной активности зарождается «в недрах» старого. Рекуррентная геомагнитная активность обусловлена корональными дырами, которые, как мы знаем, возникают, как правило, над униполярными областями фотосферного магнитного поля. Следовательно, истинный 11-летний цикл начинается в середине ветви спада появлением и усилением не биполярных, а униполярных магнитных областей. Эта первая стадия

развития заканчивается к началу того 11-летнего цикла, с которым мы привыкли иметь дело. В это время начинается его вторая стадия, когда развиваются биполярные магнитные области и все те явления солнечной активности, о которых мы уже говорили. Она длится до середины ветви спада привычного нам 11-летнего цикла, когда происходит зарождение нового цикла. Любопытно, что столь важная особенность 11-летнего цикла не была замечена непосредственно на Солнце, но ее удалось установить при изучении влияния солнечной активности на атмосферу Земли.

3. 22-летний цикл солнечной активности

Регулярные наблюдения магнитных полей солнечных пятен, открытых в начале нынешнего столетия американским астрономом Дж. Хейлом, привели к окончательному признанию реальности 22-летнего цикла солнечной активности, существование которого заподозрил еще Р. Вольф. В 1913 г. в конце 14-го цикла по цюрихской нумерации, Хейл впервые показал, что полярность магнитных полей ведущих (хвостовых) пятен северного (южного) полушария Солнца изменяется на противоположную при переходе от одного 11-летнего цикла к другому. А поскольку знак их противоположен у ведущего и хвостового пятен группы и у соответствующих пятен северной и южной полусферы, то получается, что они как бы меняются местами в отношении магнитных свойств. Таким образом, магнитные поля групп солнечных пятен получают первоначальную полярность не через 11 лет, а через 22 года. В дальнейшем такие изменения наблюдались в течение всех последующих 11-летних циклов, что позволило навсегда покончить со спорами относительно реальности 22-летнего цикла. Это был первый случай, когда выявление солнечного цикла покоилось на прочной физической основе и не нуждалось в дополнительных математических подтверждениях.

Если исходить из цюрихской нумерации 11-летних циклов, то оказывается, что в нечетных циклах полярность магнитного поля ведущих пятен групп северного полушария положительная (северная), а в четных циклах — отрицательная (южная). В южном полушарии наблюдается противоположная картина. Заметим, что вектор магнитного поля отрицательной полярности на-

правлен внутрь Солнца. В последние годы подобное же изменение знака было обнаружено и у слабых магнитных полей вблизи полюсов Солнца, только не в минимуме, а максимуме 11-летних циклов. О нем уже говорилось раньше. Поэтому здесь мы ограничимся только замечанием, что если в первой половине 11-летнего цикла (до смены знака полярного магнитного поля) полярность этих полей соответствует полярности хвостового пятна группы данного полушария, то во второй его половине — полярности ведущего пятна. Наконец, еще две физические характеристики Солнца, по-видимому, подчиняются 22-летнему циклу: изменение диаметра Солнца и величины собственного движения солнечных пятен вдоль меридиана. Но они не настолько достоверны, чтобы на их основе делать какие-либо решающие выводы. Если никто теперь не сомневается в изменении полярности магнитного поля пятен, то многие отнюдь не убеждены не только в реальности 22-летнего цикла колебаний диаметра Солнца, но даже самих его изменений. Примерно то же самое, но с гораздо меньшими оговорками, относится и к собственным движениям пятен.

Итак, в настоящее время все уверены в том, что 22-летний цикл солнечной активности действительно существует, по крайней мере для солнечных пятен. Почему же в таком случае, если воспользоваться всем рядом чисел Вольфа, которым мы теперь располагаем, и применить к нему наиболее совершенные методы математической статистики, этот цикл теряет свою осязаемость или выступает, самое большее, как бледная тень 11-летнего цикла? Не стоит этому слишком удивляться. Ведь наиболее четко 22-летний цикл обнаруживается в изменении полярности, а не величины напряженности магнитного поля пятен. Но ранее мы уже говорили о том, что индекс напряженности магнитного поля пятен практически не показывает даже 11-летнего изменения.

Имеются некоторые обстоятельства, которые затрудняют возможности математического выделения 22-летнего цикла относительных чисел солнечных пятен. Главным из них является злополучный 5-й цикл, на который мы уже обращали внимание. Действительно, если бы не этот цикл, то, начиная с 1749 г., имелось бы регулярное чередование сравнительно высоких и низких

11-летних циклов. Но пока для нас так и осталось загадкой, можно ли доверять результатам наблюдений времен наполеоновских войн или же действительно правы те, кто считает, что исчезновением хотя и слабого, но полного 11-летнего цикла мы обязаны Наполеону I. Так или иначе у исследователей 22-летнего цикла не было иного выхода, как отбросить 4-й и 5-й солнечные циклы, пока не вникая в обоснование такой волюнтарности. Этот обходной маневр сразу же привел к очень интересному результату. Оказалось, что если связь суммы среднегодовых чисел Вольфа четных 11-летних циклов с суммой нечетных циклов очень тесная, то она становится весьма слабой, если связывать, наоборот, нечетные циклы с четными. Несколько позднее такой же результат был получен и для максимальных относительных чисел пятен, причем максимальное число нечетного цикла, как правило, выше, чем четного. Этот вывод обычно называют правилом Гневышева — Оля, по имени советских исследователей Солнца, впервые получивших его. Таким образом, выяснилось, что 22-летний цикл начинается с четного, более низкого 11-летнего цикла.

На первый взгляд, результат этот может показаться ненадежным, а сам вопрос лишенным смысла. Действительно, мы преднамеренно отбросили имеющееся исключение, а с точки зрения математической статистики тем самым уменьшили и без того малый ряд и, следовательно, нарушили строгость математического доказательства. Кроме того, можно поставить вопрос и так: а зачем, собственно говоря, искать, с чего начинаются сутки, с дня или с ночи? Именно так и действовали не так давно исследователи солнечной активности, которые исходили только из строгости применения математических методов. Но при этом они, с одной стороны, забывали о физическом доказательстве реальности 22-летнего цикла, а с другой, — невольно допускали, что этот цикл является не более чем суммой двух 11-летних циклов и, таким образом, не представляет никакого самостоятельного интереса. К счастью, задолго до появления подобной точки зрения были обнаружены, правда, полукачественно, некоторые любопытные особенности 22-летних циклов солнечных пятен.

Оказалось, что чем больше сумма среднегодовых чисел Вольфа в данном 22-летнем цикле, тем меньше

его продолжительность. Эта сумма определяет также длину следующего 22-летнего цикла, которая ей прямо пропорциональна. В каждом таком цикле максимальное число Вольфа данного 11-летнего цикла изменяется обратно пропорционально его величине в предшествующем цикле. Чем больше мощность предыдущего 22-летнего цикла, тем меньше мощность последующего и, следовательно, тем больше его длительность. Подобные же связи обнаружены для суммарной площади солнечных пятен. И вот что самое удивительное. Совсем неожиданно правило Гневышева — Оля (притом без исключения каких-либо циклов) получило подтверждение в результате изучения связи длительностей 22-летнего и составляющих его 11-летних циклов. Выяснилось, что связь продолжительности 22-летних циклов, построенных по этому правилу, с длиной 11-летнего цикла, с которого он начинается, очень тесная, тогда как в случае искусственных 22-летних циклов, составленных из нечетных и четных 11-летних, она гораздо слабее.

22-летний цикл обнаруживается не только по суммарным и максимальным относительным числам пятен, но и по их среднегодовым значениям в годы вблизи эпохи максимума 11-летнего цикла. Для этих лет тоже характерна обусловленность каждого из среднегодовых чисел нечетного цикла величиной этих чисел в четном цикле. Эта особенность 22-летнего цикла солнечных пятен нередко используется для практических целей при предвычислении чисел Вольфа.

В 18-м цикле солнечных пятен максимальное число Вольфа оказалось выше, чем в 17-м. Это вызвало настоящий переполох среди исследователей солнечной цикличности. Неужели снова нарушение 22-летнего цикла? Но с магнитными полями пятен не произошло ничего необычного. Да и следующий, 19-й цикл был выше своего предшественника, как ему и полагалось. Как выяснилось, дело здесь было не в 22-летнем цикле, а в цикле солнечной активности большей длительности, о котором мы будем говорить в следующем разделе. А пока лишь заметим, что здесь и всплыла на поверхность двойственность чисел Вольфа, о которой мы упоминали в разделе 1 этой главы. Стоило только заменить относительные числа пятен числом вновь появившихся групп, как все стало на свои места и 18-й цикл, как ему и полагалось, оказался ниже 17-го.

Мы уже знаем, что индекс средней площади групп солнечных пятен практически не показывает 11-летнего цикла. Но зато ему присущ 22-летний цикл изменения. Правда, этот цикл гораздо слабее, чем для числа групп и даже их суммарной площади. Тем не менее, с ним нельзя не считаться. Более того, даже из очень ограниченного материала по солнечным вспышкам видно, что 22-летний цикл присущ и их частоте. Некоторые намеки этого цикла можно заметить и в строении групп пятен. Действительно, если в нечетных циклах группы отличаются обилием мелких пятен и пор, то в четных чаще всего они состоят из сравнительно небольшого числа пятен довольно внушительных размеров. К сожалению, данные о факельных площадках, протуберанцах и солнечной короне, имеющиеся в нашем распоряжении, не позволяют сделать какие-либо определенные выводы о существовании или отсутствии в их изменениях 22-летнего цикла.

4. Длинные циклы солнечной активности

Если 11-летний и 22-летний циклы солнечной активности в течение долгого времени считаются надежно установленными, то даже само существование, не говоря уже о средней продолжительности, ее более длинных циклов, чаще вызывает сомнение, чем признание исследователей Солнца. Мы здесь не будем говорить о 33-летнем и 44-летнем циклах солнечных пятен, которые столь же часто открывали, как и закрывали. Во всяком случае сейчас их изучение не продвинулось дальше самого их обнаружения методами математической статистики на очень ограниченном материале. В самое последнее время исследование так называемых кривых гистерезиса, связывающих точки соседних 11-летних циклов на диаграмме максимальное число Вольфа — длина цикла, привело к выделению 55-летнего цикла солнечных пятен, существование которого было заподозрено еще Р. Вольфом. Правда, при этом был обнаружен один цикл с необычной по сравнению с остальными кривой гистерезиса. Любопытно, что 55-летний цикл проявляет себя и в многолетнем изменении закона дифференциального вращения Солнца на ветви спада 11-летних циклов. Однако существование этого цикла пока не может считаться окончательно

установленным. Поэтому мы обратимся к гораздо более изученному и интересному вопросу об особенностях векового, или 80—90-летнего цикла солнечных пятен, который последние два-три десятилетия был источником ожесточенных споров и самых любопытных результатов исследования солнечной цикличности.

Ранее мы уже говорили о том, что продолжительность и интенсивность 22-летних циклов испытывают заметные изменения со временем. Характер таких изменений тоже циклический. Это впервые обнаружил Р. Вольф и даже установил их средний период: 67—83 года. Но цюрихский ряд относительных чисел пятен был тогда столь короток, что можно было строить лишь догадки об истинной продолжительности этого цикла. Только в сороковых годах нынешнего века было установлено, что средняя длительность его близка к столетию. Отсюда появилось и его название — вековой цикл. Если говорить точнее, то по различным определениям средняя продолжительность векового цикла составляет 80—90 лет. К сожалению, данные о числах Вольфа, которыми мы располагаем в настоящее время, не позволяют считать эту оценку достаточно надежной. Ведь при такой длительности цикла двести сорок с небольшим лет — срок явно недостаточный для строгих методов математической статистики. Вот почему спор о том, существует ли в действительности вековой цикл солнечных пятен, не прекратился до сих пор. И если чаша весов все-таки сейчас склоняется в пользу тех, кто не сомневается в его реальности, причиной тому, скорее всего, являются многочисленные косвенные доказательства, связанные с некоторыми особенностями главным образом солнечных пятен.

Наиболее четко 80—90-летняя вариация выделяется по сумме среднегодовых чисел Вольфа в 11-летнем цикле или по максимальным их значениям. Для того чтобы избавиться от искажений, вносимых колебаниями меньшей длительности, обычно применяют математические приемы, которые дают более плавную кривую. Чаще всего используется сглаживание по четырем точкам, причем в роли точки теперь выступает 11-летний цикл (рис. 15). С 1749 г. до наших дней по среднегодовым относительным числам пятен было выделено два минимума и три максимума вековых циклов. Согласно цюрихской нумерации 11-летних циклов, миниму-

мы были в 6-м и 14-м циклах, а максимумы в 3-м, 9-м и, по-видимому, 19-м циклах. Для некоторых чисто качественных оценок можно воспользоваться рядом данных о высоте и эпохах экстремумов 11-летних циклов, полученным английским исследователем Дж. Шове по историческим записям пятен и полярных сияний с 648 г. до н. э. до начала регулярных наблюдений солнечных пятен. Но при этом следует помнить, что хотя связь солнечных пятен с полярными сияниями очень

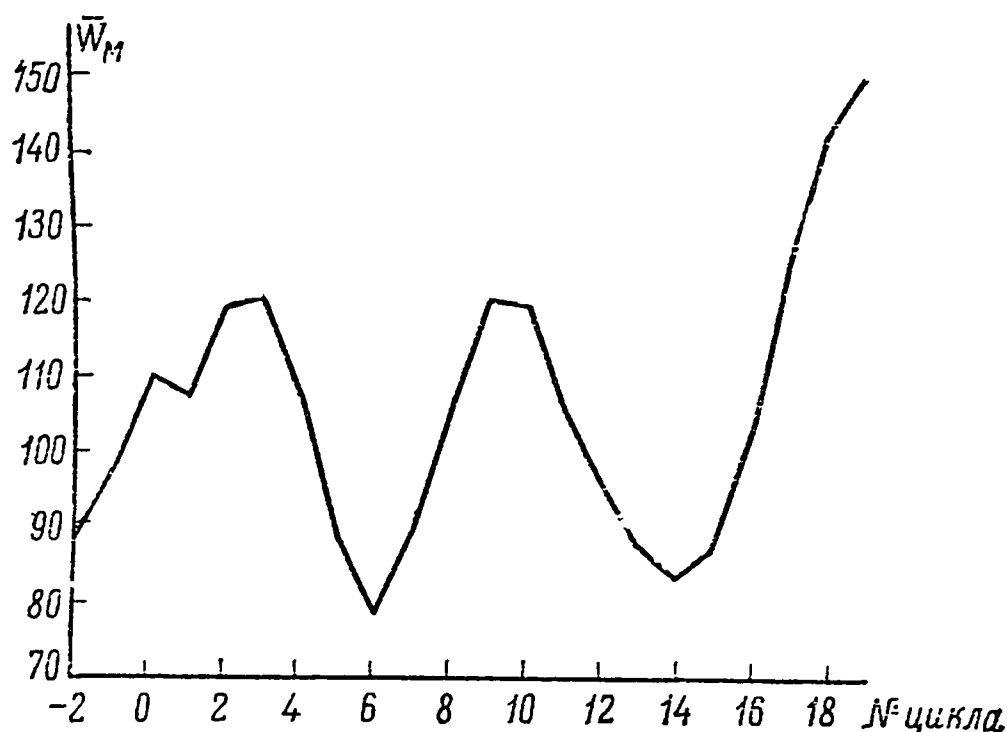


Рис. 15. Кривая изменения сглаженных методом Глайсберга максимальных среднегодовых относительных чисел солнечных пятен за 1700—1980 гг. По оси абсцисс нанесены номера 11-летних циклов (по Цюриху).

тесная, тем не менее она статистическая. Поэтому точность экстремумов 11-летних циклов, хотя при их определении и учтен сдвиг примерно на три года максимума чисел Вольфа относительно максимума числа полярных сияний, в этом ряду весьма невысокая. Их неопределенность равна 2—3 годам, а иногда и больше. Тем не менее ряд Шове является дополнительным подтверждением реальности векового цикла солнечных пятен. Ведь он содержит с 200 г. до н. э. (когда данные уже не носили обрывочного характера) и до наших дней 197 одиннадцатилетних циклов.

Хотя первоначально 80—90-летний цикл был обнаружен по среднегодовым значениям чисел Вольфа, тем не менее этот индекс отнюдь не является лучшим для решения рассматриваемой задачи. Если разложить числа Вольфа на их основные составляющие — число групп и среднюю продолжительность их существования, —

то оказывается, что первая в основном показывает изменения со средним периодом 11 лет, о чем уже говорилось, тогда как вторая — со средним периодом 80—90 лет. Таким образом, можно сказать, что если 11-летний цикл характерен для частоты явлений солнечной активности, то вековой цикл — для их мощности. К сожалению, пока мы не располагаем достаточно длинными рядами наблюдений каких-либо других активных образований на Солнце, кроме солнечных пятен. И в этом смысле наше заключение является гипотетическим. Но для солнечных пятен его можно считать достаточно надежным.

Как мы уже говорили, имеется ряд косвенных подтверждений существования векового цикла солнечных пятен. Одним из них служит тот факт, что вблизи максимумов этих циклов ширина зон пятен расширяется и в это время наблюдается необычно большое число высокоширотных групп пятен. В частности, именно так и обстояло дело в 18-м и 19-м циклах. Уже упоминалось, что соотношение между уровнем активности в северном и южном полушариях Солнца изменяется в среднем с периодом 80—90 лет. Вековой цикл обнаруживается также в некоторых связях между различными индексами солнечной активности. В частности, он проявляется в изменении коэффициентов соотношения между площадью и напряженностью магнитного поля пятен. По мере развития векового цикла в среднем уменьшается максимальная напряженность магнитного поля пятен и увеличивается число самых крупных, а также короткоживущих групп пятен. Возрастает к максимуму векового цикла и средняя широта групподнодневок и групп с продолжительностью существования больше 6 суток, появляющихся на широтах выше $\pm 20^\circ$. Параллельно с этим происходит уменьшение величины собственных движений групп пятен. Вековые изменения проявляются также в кривых изменения площади групп пятен. Они характерны и для изменений со временем средних значений средней и максимальной площади групп. Наконец, один из коэффициентов формулы, определяющей кривую 11-летнего цикла, тоже показывает вековой цикл.

Как видите, подтверждения реальности векового цикла солнечных пятен довольно разнообразны, и с ними нельзя не считаться. В свое время было выдвинуто и

множество геофизических подтверждений векового цикла. Но вполне естественно, что они не могли быть решающими, поскольку требовалось еще доказать их солнечное происхождение. Таким образом, получался как бы замкнутый круг. Теперь же, когда сами солнечные явления дали нам такие подтверждения, вряд ли имеет смысл апеллировать еще и к нашей планете. Остается только один вопрос: какова же средняя продолжительность векового цикла? Пока однозначно ответить на него невозможно. Единственное, что для нас ясно уже и сейчас, это то, что продолжительность векового цикла колеблется в довольно широких пределах: судя по данным ряда Шове от 30 до 120 лет. В последние годы дополнительное убедительное свидетельство в пользу реальности 80—90-летнего цикла солнечных пятен было получено при анализе концентрации радиоуглерода в датированных образцах древесины.

Самая разительная особенность векового цикла была выявлена с помощью ряда Шове. Выяснилось, что, в отличие от 11-летнего цикла, ветвь роста 80—90-цикла тем длиннее, чем больше его интенсивность. В то же время характер связи длины ветви спада 11-летнего и векового циклов с их интенсивностью практически одинаков. Вековой цикл связан не столько с самим 11-летним циклом, сколько с одним из периодов его тонкой структуры, 10-летним, и кратен именно этому периоду. Начинается он не в эпоху минимума, а вскоре после эпохи максимума 11-летнего цикла. Более того, первый год после максимума 11-летнего цикла характерен тем, что величина отношения сглаженных по четырем точкам вторых разностей чисел Вольфа к соответствующим им числам Вольфа практически постоянна и отрицательна. Такой же результат получается и для индекса средней продолжительности жизни групп пятен. Это показывает, что 80—90-летний цикл, в отличие от 11-летнего, который напоминает взрыв, имеет характер свободных гармонических колебаний. Возможно, такие колебания вызываются циклическими изменениями глубины конвективной зоны Солнца. Таким образом, мы могли убедиться в том, что 80—90-летний цикл — цикл особый.

Некоторые исследователи солнечной цикличности считают, что дополнительным свидетельством в пользу

реальности существования векового цикла является нарушение закономерностей 22-летнего и 11-летнего циклов вблизи его экстремумов. Действительно, если не принимать всерьез оговорок относительно 5-го цикла, то получается, что отступление от общего правила относится к 4—5-му циклам и 8—9-му циклам, расположенным соответственно вблизи минимума и максимума векового цикла. Кроме того, именно в 9-м и 19-м циклах, т. е. в максимуме вековых циклов, было отмечено нарушение соотношения между длиной ветви роста и высотой 11-летнего цикла. Насколько верно такое утверждение, опять-таки покажет будущее. Но и сейчас ясно, что его нельзя считать безосновательным.

До сих пор речь шла только о таких солнечных циклах, которые внушают доверие уже хотя бы потому, что они установлены на основе фактического материала по наблюдениям солнечных пятен. Но все эти циклы еще не могут объяснить особенностей кривой изменения чисел Вольфа даже за 240 с небольшим лет. Стоит только взглянуть на кривую максимальных относительных чисел пятен, как сразу бросается в глаза ее медленный, но неуклонный подъем. Вряд ли эту особенность можно объяснить, не допустив существования какого-то гипотетического длинного цикла. И вот тут мы невольно вступаем в область сплошных предположений. Поэтому не стоит удивляться, что дальше пойдут еще более многочисленные оговорки, без которых читатель невольно был бы введен в заблуждение относительно надежности полученных выводов.

Вполне понятно, что проще всего было бы допустить существование «двойного» 80—90-летнего цикла длительностью 15 или 16 одиннадцатилетних циклов. Но ведь никто не может сказать, что подъем максимальных чисел Вольфа уже закончился и начался их спад. Поэтому с равным успехом можно признавать или отрицать правомерность такой точки зрения. Более того, 20-й и текущий 21-й циклы солнечных пятен, мягко говоря, не способствовали ее утверждению. Единственное, что вытекает из данных ряда Шове и цюрихского ряда чисел Вольфа, это четкость векового цикла в четных столетиях и его «рыхлость» и «размазанность» в нечетных.

Гораздо более надежным, хотя тоже гипотетическим, является утверждение о том, что продолжитель-

ность «длинного» цикла составляет по крайней мере несколько столетий или близка к тысяче лет. Именно к такому выводу привело изучение отношения длины ветви роста к длине ветви спада 11-летнего цикла солнечных пятен за период с 1615 по 1937 г. К подобному же заключению ведет и изменение со временем тесноты связи между длиной ветви роста и высотой 11-летнего цикла. Существуют и косвенные данные, которые свидетельствуют в пользу такого утверждения. В частности, об этом говорит изменение числа комет, видимых невооруженным глазом, числа полярных сияний, а также толщины колец деревьев. Они дают длину цикла, равную примерно 600 годам. Такая же продолжительность «длинного» цикла вытекает из ряда Шове. Иногда называют также цифру 400 лет тоже на основании данных о кометах. Любопытно, что примерно за 600 лет до 19-го цикла было отмечено событие, хорошо известное из истории Земли. Именно в это время на нашей планете произошло настолько сильное похолодание, что некогда покрытая зеленью Гренландия превратилась в привычную для нас землю льдов. Теперь ясно, почему она получила столь непонятное название (green по-английски «зеленый»). Просто оно относится не к настоящему этой северной земли, а к ее прошлому.

Если продолжительность длинного цикла действительно составляет примерно 600 лет, то ближайшие 11-летние циклы должны дать перелом в кривой максимальных чисел Вольфа. Пока мы вынуждены ограничиться этими весьма предположительными рассуждениями, которые сейчас невозможно ни доказать, ни опровергнуть.

5. Флуктуации солнечной активности

Стоит нам обратиться к более коротким интервалам времени усреднения индексов солнечной активности, хотя бы к среднемесячным или среднеквартальным числам Вольфа, как от плавности циклической кривой не остается и следа. Вся она приобретает очень сложный вид с множеством пиков и углублений, располагающихся в самом хаотическом порядке. Такие отклонения от среднего хода циклической кривой обычно называют флуктуациями солнечной активности. Размах (или амплитуда) этих флуктуаций весьма различен. Да и среднее

количество их за год тоже испытывает значительные колебания от одного 11-летнего цикла к другому. Наиболее детально были изучены флуктуации относительных чисел и суммарной площади солнечных пятен.

Для изучения солнечных флуктуаций используют как «разностные», так и «относительные» индексы. Первые представляют собой разности полученных из наблюдений и сглаженных тем или иным способом величин показателей солнечной активности. Вторые являются отношениями полученных из наблюдений значений этих индексов к сглаженным их величинам. Обычно их называют индексами флуктуируемости. Разностные показатели флуктуаций изменяются в общем параллельно ходу 11-летнего цикла. Поэтому их относительные индексы можно считать более «чистой» характеристикой. Но было бы заблуждением принимать их за идеальный показатель. Вблизи эпохи минимума, когда значения индексов солнечных пятен близки к нулю, определение индекса флуктуируемости становится затруднительным, а иногда и невозможным.

Основными характеристиками флуктуаций солнечной активности, в частности, индексов солнечных пятен, являются их амплитуда и продолжительность. Амплитуда определяется как максимальное отклонение от соответствующего сглаженного значения индекса, который мы рассматриваем. В случае индекса флуктуируемости это отклонение от единицы. Продолжительность флуктуаций можно определить двумя способами: либо как время между соседними минимальными величинами рассматриваемого показателя солнечной активности, либо как время между последовательными пересечениями кривой индексов, полученных из наблюдений, с кривой их сглаженных значений. Хотя первый способ кажется более естественным, чаще применяют второй способ, поскольку он более удобен в случае наиболее употребительного индекса флуктуируемости.

Каково же соотношение флуктуаций и циклов солнечных пятен? На этот счет имеются два крайних взгляда, которые, как это ни странно, выражают одну и ту же методологическую позицию. Согласно первому из них 11-летний цикл является суммой более коротких циклов, которые называют флуктуациями. В соответствии с другой точкой зрения все солнечные циклы — это флуктуации, только большей длительности. Следо-

вательно, и солнечные флуктуации и солнечные циклы — изменения одного типа. Либо и те и другие являются периодами с возмущениями, либо и первые и вторые представляют собой случайные колебания. Но как только мы переходим от общих рассуждений к численной проверке с помощью методов математической статистики, оба эти взгляда теряют под собой почву. Ведь, как мы уже видели, циклы солнечной активности — это периоды с возмущениями, т. е. такие периоды, средняя продолжительность которых сохраняется в течение длительных промежутков времени, хотя в различных циклах она и испытывает некоторые колебания, как и высота циклов. Совсем иное дело флуктуации солнечной активности. Их появление носит не периодический, а случайный характер, и в этом смысле их можно считать как бы независимыми процессами.

Особое значение имеют так называемые сильные флуктуации солнечной активности. Они дают не только наибольшие отклонения от хода 11-летнего цикла, но в некоторых случаях даже приводят к появлению вторичных максимумов в этом ходе. Естественно, что для выделения таких флуктуаций приходится вводить определенные условные критерии. Обычно к ним относят флуктуации, амплитуда которых превышает одно стандартное отклонение от кривой среднегодовых значений рассматриваемых индексов солнечной активности. Использование этого критерия позволило выделить сильные положительные и отрицательные флуктуации среднемесячных чисел Вольфа с 1766 г., а среднемесячных суммарных площадей пятен с 1879 г. по настоящее время.

Подробнее всего были изучены сильные флуктуации относительных чисел солнечных пятен. Самой важной особенностью положительных сильных флуктуаций является то обстоятельство, что имеются годы 11-летнего цикла, в которые они особенно «любят» появляться. Это первый год до эпохи максимума и третий год после нсе. Вспомним, что эти же годы оказываются характерными для наиболее мощных явлений солнечной активности. А вот отрицательные сильные флуктуации «совершенно безразличны» к фазе 11-летнего цикла. Только в самых низких циклах они отдают «предпочтение» первому году до эпохи максимума,

Флуктуации солнечной активности меньшей амплитуды тоже показывают зависимость от фазы 11-летнего цикла, но гораздо менее четкую, чем у положительных сильных флуктуаций. Следовательно, хотя в общем флуктуации чисел Вольфа никак нельзя считать периодическим процессом, отдельное их рассмотрение по признакам продолжительности и амплитуды выявляет некоторые их «локальные» устойчивые тенденции в 11-летнем цикле. Более 80% всех флуктуаций относительных чисел пятен имеют продолжительность от двух до четырех месяцев. При этом на ветви спада преобладают флуктуации длительностью два месяца, на ветви же роста 11-летнего цикла число флуктуаций длительностью два и три месяца практически одинаково. В то же время, для ветви роста свойственны появления флуктуаций амплитуд меньше 0,60 по сравнению с ветвью спада.

Большинство флуктуаций солнечных пятен проходит синхронно в северном и южном полушарии Солнца. В эпохи минимума 11-летних циклов оказываются в достаточной степени синхронизированными флуктуации старого и нового циклов. Средняя продолжительность и амплитуда флуктуаций индексов солнечных пятен испытывают 80—90-летнюю циклическую вариацию. Эта особенность наиболее четко заметна на ветви спада 11-летнего цикла.

Интересно, что средняя длительность флуктуаций солнечной активности совпадает со средней продолжительностью «флоккульной» фазы центров активности. Поэтому наиболее эффективным и «физичным» было бы не статистическое изучение изменения со временем индексов солнечных пятен, но исследование эволюции центров активности, а также средних их характеристик. Впервые проведенное исследование такого рода сразу же привело к важному выводу. Оказалось, что существуют два типа флуктуаций, связанных с центрами активности: первичные и вторичные. Если первые разделяют промежутки времени примерно в 15 оборотов Солнца, то вторые — от трех до пяти оборотов. На ветви спада 11-летнего цикла обычно наблюдается 5—6 первичных флуктуаций, причем 2—3 из них сопровождаются повышенной вспышечной активностью. В циклических изменениях средних характеристик центров активности в 11-летнем цикле, как правило, замет-

ны два-три вторичных максимума. Но самым интересным, пожалуй, является то обстоятельство, что наиболее долго центры активности существуют за 1—2 года до эпохи минимума 11-летнего цикла. Все это служит дополнительным подтверждением свойств флуктуаций солнечной активности, о которых мы уже говорили.

6. Маундеровский и прочие длительные минимумы

Несколько лет назад в изучении солнечной активности произошло событие, которое произвело впечатление разорвавшейся бомбы. Связано оно с именем американского исследователя Солнца Дж. Эдди, который заявил что по крайней мере в течение 70 лет XVII столетия, с 1645 по 1715 год, хорошо известный всем 11-летний цикл солнечных пятен «не работал», а может быть, и раньше его не было. Эта сенсация второй половины нашего века, когда страсти улеглись, свелась к проблеме существования длительных минимумов солнечной активности, в особенности самого близкого к нашему времени, так называемого маундеровского минимума.

Менее чем через полстолетия после того, как солнечные пятна были зарегистрированы с помощью телескопа, с 1645 г. в истории Солнца наступил странный период, когда оно за 70 лет «выдало» пятен меньше, чем за один год в эпоху минимума чисел Вольфа нашего времени и все эти пятна располагались в основном на широтах ниже 10° . С легкой руки Эдди этот период получил название маундеровского минимума солнечной активности по имени английского исследователя Солнца Е. Маундера, который дал его детальное описание. Справедливости ради следовало бы вспомнить, что минимум этот сначала не менее подробно был описан Р. Вольфом, а затем Шперером. Что же касается Маундера, то он скорее явился популяризатором этого периода, притом блестящим. Тем не менее все его призывы не нашли отклика у астрономов-профессионалов. И получилось так, что потребовался целый вековой цикл, чтобы о маундеровском минимуме вспомнили снова, но уже с гораздо большим шумом, чем это было при его обнаружении. Самое смешное, что Вольф, который первый его заметил, был обвинен в том, что

«распространил» 11-летний цикл и на это время, якобы находясь «под гипнозом своего открытия».

Каковы же характерные особенности маундеровского минимума солнечных пятен? Прежде всего он отличался полным отсутствием пятен на видимой поверхности Солнца в течение продолжительных интервалов времени, от нескольких до десяти лет. В частности, так было с 1661 по 1670 год и с 1671 по 1683 год. В те же годы, когда пятна все-таки появлялись, их было так мало и они располагались на таких низких широтах, что выделение эпох их максимумов оказалось делом весьма затруднительным. И все же Вольф сумел с этим справиться, отдавая себе отчет в том, что ошибка таких определений могла достигать двух лет. Именно во время маундеровского минимума впервые проявила себя асимметрия северного и южного полушарий Солнца, причем в самой категоричной форме. С 1672 по 1704 год в северном его полушарии не наблюдалось ни одного пятна.

Такой необычайно низкий уровень солнечной активности отразился и на атмосфере нашей планеты. В это время отмечались очень низкая геомагнитная активность и совсем мало полярных сияний. Дополнительные сведения дают наблюдения солнечных пятен, видимых невооруженным глазом, и полных солнечных затмений, зафиксированные в китайских летописях. Они показывают, что маундеровский минимум отличался полным отсутствием больших групп пятен и что солнечная корона в это время характеризовалась отсутствием внутренней структуры, которая обычно видна в эпоху максимума 11-летнего цикла. Еще одно косвенное свидетельство принесли исследования концентрации радиоуглерода ^{14}C в датированных образцах древесины. В периоды наиболее высокой солнечной активности поток галактических космических лучей, вызывающий образование радиоуглерода, ослабляется, что приводит к уменьшению его концентрации. При низкой солнечной активности наблюдается противоположная картина. Оказалось, что во время маундеровского минимума концентрация ^{14}C максимальна, тем самым подтверждая его реальность.

Итак, маундеровский минимум представляет собой длительный период необычно низкой солнечной активности. Согласно данным Эдди, самые высокие среднего-

дичные значения чисел Вольфа в это время не превышали 18. Учитывая, что материалы, по которым они восстанавливались, были далеко не полными и обрывочными и носили, как правило, качественный характер, можно с равным успехом доказывать их правильность или ошибочность. Но если отвлечься от этого, хотя и немаловажного обстоятельства, и исходить из всего комплекса и прямых и косвенных данных, то становится очевидным, что солнечная активность во время маундеровского минимума заметно отличалась от той, к которой мы привыкли. Очень образное ее описание дал Маундер: «Так же, как в сильно затопленной местности самые возвышающиеся области еще будут поднимать свои головы над паводком, и шпиль здесь, холм, башня или дерево там способны дать очертания конфигурации затопленной равнины, годы с пятнами, по-видимому, выделяются, как кресты затонувшей кривой пятен». Как видим, существование 11-летнего цикла в этот период у Маундера, в отличие от Эдди, не вызывало сомнения. Только слишком необычно тогда выглядел этот цикл.

Необычность ситуации на Солнце в течение столь длительного времени сразу же заинтересовала физиков и астрофизиков-теоретиков. Они создали ей такую рекламу, о которой не мог даже мечтать Маундер. И это вполне понятно. Если действительно, как утверждал Эдди, 11-летний цикл внезапно прекращает «работать» или же сначала вообще отсутствует, а затем появляется «сразу», чем это можно объяснить? Детально разработанная к настоящему времени динамо-теория 22-летнего цикла солнечной активности, о которой мы будем говорить в главе 6, не давала ответа на этот вопрос. Она покоится на «двух китах»: магнитных полях и крупномасштабных движениях Солнца. Если бы произошло такое внезапное изменение солнечной активности, то оно должно было бы найти свое проявление в одном из этих «китов». На основании измерений координат пятен на зарисовках Солнца, сделанных Гевелием в 1642—1644 гг., т. е. накануне начала маундеровского минимума, Эдди обнаружил резкое увеличение экваториальной угловой скорости вращения нашего дневного светила по сравнению с наблюдаемой ныне при сохранении ее величины на высоких широтах. Этот результат «подлил масла в огонь». Появилось множество

теоретических работ, авторы которых силились объяснить феномен маундеровского минимума.

Но многие исследователи Солнца и солнечно-земных связей, не возражая принципиально против аномально низкого уровня солнечной активности в 1645—1715 гг., привели ряд доводов в пользу сохранения 11-летнего цикла солнечных пятен в это время и отсутствия внезапности в появлении маундеровского минимума. Особенно помогли им в этом многочисленные и достаточно полные данные о полярных сияниях, о кометах, видимых невооруженным глазом, об иловых отложениях в озерах и даже рукописи диссертаций XVII столетия о солнечных пятнах. Еще один важный довод в пользу постепенности процесса дало изучение многолетних изменений закона дифференциального вращения Солнца по гринвичским материалам о группах пятен. Оказалось, что величина уменьшения угловой скорости его вращения для конца ветви спада 11-летнего цикла тем больше, чем ниже высота следующего цикла. Эта закономерность прекрасно сохраняется и на период маундеровского минимума. Поэтому нет оснований строить теории солнечного цикла, которые исходили бы из внезапного изменения основных физических характеристик Солнца.

Какова же тогда причина появления маундеровского минимума солнечной активности? Наиболее вероятным его объяснением могло быть взаимодействие между 600-летним (или, возможно, 400-летним) и вековым циклами солнечных пятен. Действительно, вблизи минимума 600-летнего цикла форма 80—90-летнего может быть сильно искажена: он заметно «подавляется», а максимум его сдвигается на более позднее время. Именно такая картина и наблюдалась в XVII столетии. Любопытно, что наше время выглядит как маундеровский минимум «наоборот»: уже в течение пяти 11-летних циклов величина максимальных чисел Вольфа не опускалась ниже 100.

Как мы уже упоминали, маундеровский минимум в целом (без деталей) достаточно четко выделяется по максимуму концентрации радиоуглерода ^{14}C . Изучение этой характеристики по датированным образцам древесины за восемь тысяч лет показало, что маундеровский минимум отнюдь не одинок. По соседству с ним, в 1450—1550 гг., располагается так называемый шпереровский

минимум солнечных пятен, впервые четко выделенный Эдди. Антиподом ему служит период низкой концентрации радиоуглерода в 1100—1250 гг. Шпереровский минимум солнечных пятен был столь же глубоким (если не глубже), как маундеровский. В более древние времена обнаруживаются еще несколько продолжительных минимумов солнечной активности, по крайней мере, вокруг 400, 750, 1400, 2850 и 3300 годов до н. э. Сейчас еще трудно судить, насколько радиоуглеродный метод может помочь в исследовании долговременных изменений активности Солнца. Но пока, даже при его нынешней точности и сравнительно невысоком временном разрешении, на него возлагают большие надежды.

7. Существует ли иерархия солнечных циклов?

В начале 50-х годов нынешнего столетия широкое распространение нашла гипотеза иерархии циклов солнечной активности. В основе ее лежала вполне здравая мысль о том, что вся солнечная активность безотносительно к масштабам времени обусловлена единой причиной. Отсюда был сделан вывод, что все солнечные колебания представляют собой ритмы и составляют единую физическую систему, т. е., по-видимому, генетически едины. Доказывалось это положение следующим образом. Одиннадцатилетний цикл солнечной активности, который наиболее устойчив во времени, является как бы «атомом, квантом или элементом» циклов большей длительности. Все циклы солнечных пятен в общем отличаются сходством формы циклических кривых и их средние продолжительности примерно кратны друг другу. В свою очередь 11-летний цикл тоже состоит из более кратковременных элементов-импульсов солнечной активности (или, как мы привыкли говорить, активных областей, которые составляют основу солнечных флуктуаций), т. е. является импульсом импульсов. Наконец, импульсы, состоящие на уровне солнечной фотосферы из групп пятен, представляют собой группу групп.

При всей своей привлекательности гипотеза иерархии солнечных циклов не выдержала испытания временем, хотя и до сих пор порой мы сталкиваемся с попытками ее возрождения. Начнем с того, что ни циклы, ни флуктуации солнечной активности не могут

рассматриваться как ритмы. Существует по крайней мере пять типов колебаний природных показателей, в частности, и индексов солнечной активности: случайные колебания, возмущения, ритмы, периодические колебания и периодичность с возмущениями (или скрытая периодичность). Случайные колебания являются независимыми во времени. Возмущения тоже носят случайный характер, но показывают некоторую связь внутри определенных промежутков времени. Ритмы представляют собой чередование возмущений разных знаков, которое имеет какой-то средний период, но каждое следующее возмущение обязательно зависит от предыдущего. Через определенное время при ритмических колебаниях происходит накопление разности фаз по сравнению с колебаниями со средним периодом. Периодические колебания определяются строгим чередованием периодов с сохранением их размаха (т. е. амплитуды) и фазы. Скрытая периодичность отличается от них тем, что в этом случае мы имеем дело только со средним периодом колебания. Амплитуда таких колебаний изменяется, но зато, в отличие от ритмов, не происходит накопления разности фаз. В обычной речи нередко не придают значения различию смысла слов период, цикл, ритм, употребляя их, когда необходимо подчеркнуть более или менее регулярную повторяемость явлений в природе. Но, как читатель мог убедиться, на этом сходство их и кончается. Ранее мы уже говорили о том, что циклы солнечной активности лучше всего представляются как периодические колебания с возмущениями, тогда как ее флуктуации являются случайными колебаниями. Следовательно, даже по этой одной причине их нельзя сводить в единую систему.

Более того, и сами солнечные циклы различной длительности во многих отношениях принципиально отличаются друг от друга, не говоря уже о том, что кратность их тоже оказывается иллюзорной, если продвигаться дальше 22-летнего цикла. В самом деле, сравним 11-летний и вековой циклы. Как уже отмечалось, строго говоря, 80—90-летний цикл кратен не 11-летнему, а 10-летней составляющей его тонкой структуры. Более того, не очевидно, что он кратен 22-летнему циклу, который составляет физическую основу солнечной цикличности. Но не будем больше задерживаться на таком, в какой-то мере формальном вопросе, тем более,

что мы имеем дело с циклами, а не со строгими периодами. Рассмотрим теперь форму их циклических кривых. Хотя читатель уже получил об этом представление, напомним, что кривые 11-летнего и 80—90-летнего циклов сходны только в самых общих чертах. А на деле похожи только ветви спада этих циклов. Что же касается ветви роста, то в 11-летнем цикле она тем короче, а в 80—90-летнем тем длиннее, чем больше его интенсивность, определяемая максимальным числом Вольфа. Но и это еще не все. Если 11-летний цикл, судя по его циклической кривой, имеет характер взрыва с дальнейшим постепенным затуханием, то вековой цикл скорее представляет собой свободное почти гармоническое колебание. Основные свойства 11-летнего цикла, как и 22-летнего, закладываются в последние три-четыре года ветви спада предшествующего ему цикла. Для 80—90-летнего цикла определяющим оказывается первый год после эпохи максимума 11-летнего цикла. Имеются еще более глубокие различия между этими циклами. 11-летний цикл характерен для индексов частоты, а 80—90-летний — для индексов средней мощности явлений солнечной активности. Для 11-летнего цикла солнечные флуктуации служат возмущающим фактором, тогда как для векового они имеют немаловажное значение. Таким образом, 11-летний и 80—90-летний циклы не могут рассматриваться как генетически единые колебания солнечной активности.

Как мы уже видели, во многих отношениях 22-летний цикл стоит особняком среди циклов солнечной активности. Пока его гораздо лучше выделяют по качественным характеристикам, таким, как полярности магнитных полей групп пятен и областей вблизи полюсов Солнца, чем по количественным. Может быть, в будущем удастся обнаружить его достаточно четко и в других показателях солнечной активности. Но сейчас для нас он прежде всего магнитный цикл. И поскольку это так, именно он должен рассматриваться в качестве основного, хотя никто не собирается умалять «достоинств» 11-летнего цикла. Во всяком случае, в настоящее время особенности 22-летнего цикла солнечной активности не способствуют поддержке гипотезы иерархии солнечных циклов. Что же касается циклов продолжительностью больше векового, то сначала надо убедиться в их существовании и определить их характер,

а потом уже судить о их сходстве или различии с этим циклом.

Итак, к сожалению, приходится расстаться с довольно привлекательной идеей, которая стремилась объединить различные аспекты солнечной цикличности в единое целое. Утешим себя тем, что ее фиаско еще не означает отсутствия единой причины, вызывающей солнечную активность.

Глава 5

АКТИВНЫЕ ДОЛГОТЫ

1. Понятие активной долготы

Более восьмидесяти лет назад был поставлен вопрос, вызвавший ожесточенные споры среди исследователей Солнца. Споры эти продолжались до середины 60-х годов, когда он был решен достаточно определенно. Суть вопроса сводится к следующему. Как Солнце проявляет свою активность: одинаково в любой части его атмосферы или же в основном в каких-то определенных ее частях? Первоначально этот вопрос был поставлен более узко: имеются ли на видимой поверхности Солнца долготные интервалы, которые по выходу различных явлений солнечной активности более «плодовиты», чем соседние? Оказалось, что действительно существуют такие долготные интервалы, в которых преобладают группы солнечных пятен и факельные площадки. Сначала их претенциозно называли «больными долготами», отмечая тем самым что именно в них Солнце преподносит нам всевозможные неприятности. Затем придумали более скромное название «активные долготы», которое и вошло в нынешнюю терминологию. Оно тоже не очень удачно уже хотя бы потому, что подразумевает не долготу, а участок видимой поверхности Солнца, растянутый по параллели, долготный интервал. Но так или иначе оно сейчас общепринято.

Название-то придумали уже давно, а вот то, что активная долгота не статистическая фикция, долгое время доказать не могли. Многие причины мешали этому. И, пожалуй, главным препятствием служило отсутствие четкого определения, что же такое активная долгота. Даже в начале 60-х годов нынешнего столе-

тия с тем, чтобы окончательно «заккрыть» активные долготы, их вольно или невольно подменяли областями пятнообразования, или активными областями. Поэтому мы и начнем с определения активных долгот, чтобы сразу избавить читателя от той путаницы, которая долгие годы вселяла сомнения и неуверенность в умы многих даже известных исследователей солнечной активности.

Мы уже знаем, что активная область — это комплекс явлений солнечной активности, локализованный в ограниченной части атмосферы Солнца. Таким образом, в нем непрерывно возникают те или иные солнечные образования.

Совсем иное дело активная долгота. Это долготный интервал, в котором тот или другой вид солнечной активности в течение продолжительного времени (несколько лет и более) проявляется существенно сильнее, чем в других долготных интервалах.

В данном определении ничего не говорится о непрерывности этого проявления. Бывают периоды, когда активные долготы более или менее «отдыхают». Но главное заключается в том, что в конечном итоге они дают гораздо больший «выход», чем соседние области. Активные долготы сохраняются годы и даже десятилетия, тогда как активные области — в лучшем случае около года. Более того, отмечается, что активные области нередко возникают в одной и той же активной долготе.

Как было отмечено ранее, активная долгота имеет определенную ширину вдоль параллели Солнца. Какова же эта ширина? На этот счет было высказано много различных мнений, но даже сейчас еще нет однозначного ответа. Дело в том, что эта ширина до сих пор определяется просто путем подбора, с тем, чтобы получить наиболее четкую расчлененность явлений солнечной активности по долготе. Чаще всего используют интервалы шириной 40° и 30° . Такая ширина в среднем соответствует протяженности по параллели факельных площадок или самых крупных групп солнечных пятен. Меньшие долготные интервалы дают очень сложную картину, видимо, потому, что при этом мы как бы режем активные области (или их составляющие) по «живому телу». Что же касается больших интервалов, то они показывают как бы размазанную

усредненную картину распределения солнечной активности по долготе.

Первоначально активные долготы были выделены по числу групп пятен и их суммарной площади, а также по площади фотосферных факелов и протуберанцев. Что же касается других явлений солнечной активности, то ряды их наблюдений слишком коротки для того, чтобы по ним можно было сделать надежные выводы о характере их долготного распределения. Тем не менее за последние 10—15 лет в этом направлении были получены некоторые интересные результаты.

Традиционным методом выделения активных долгот является построение диаграммы долготного распределения различных индексов солнечной активности при фиксированных долготных интервалах (шириной 30° или 40°) и интервале времени (не менее 5—6 лет). Нередко вместо таких диаграмм строят так называемые солнечные календари, которые основываются на том, что синодический период вращения Солнца вокруг своей оси на широте 14° составляет 27,275 суток (см. главу 1). При этом чаще всего суммирование индексов производится не по суткам, а по трехдневкам, что дает ширину долготного интервала примерно 40° . Иногда для выделения активных долгот вместо солнечных используют «бартельсовские» календари, в которых на основе данных о геомагнитной активности принят синодический период вращения Солнца 27 суток, соответствующий широте 8° . В последнее время для той же цели используется метод изолиний, ранее нашедший широкое применение в метеорологии. В частности, именно этим методом строятся карты изобар и изотерм различных уровней земной атмосферы. Хотя для Солнца подобный метод применим лишь с известными оговорками, тем не менее он дал гораздо более надежные результаты, чем традиционные методы.

2. Основные особенности активных долгот

Поскольку самые длинные ряды наблюдений получены для солнечных пятен, основное внимание мы уделим их активным долготам. Интересно, что эти долготные интервалы отчетливо выделяются при использовании индекса суммарной площади пятен. Но стоит воспользоваться индексом числа всех групп пятен безотноси-

тельно к их площади, как реальность их становится сомнительной. Наоборот, использование индекса числа самых крупных групп (с площадью больше 500 миллионных долей видимой полусферы Солнца) дает расчлененность по долготе еще более четкую, чем для суммарной площади пятен. Отсюда можно прийти к выводу, что в то время как вся фотосфера «выдает» солнечную активность безотносительно к ее мощности, наиболее внушительные явления происходят преимущественно только в определенных долготных интервалах.

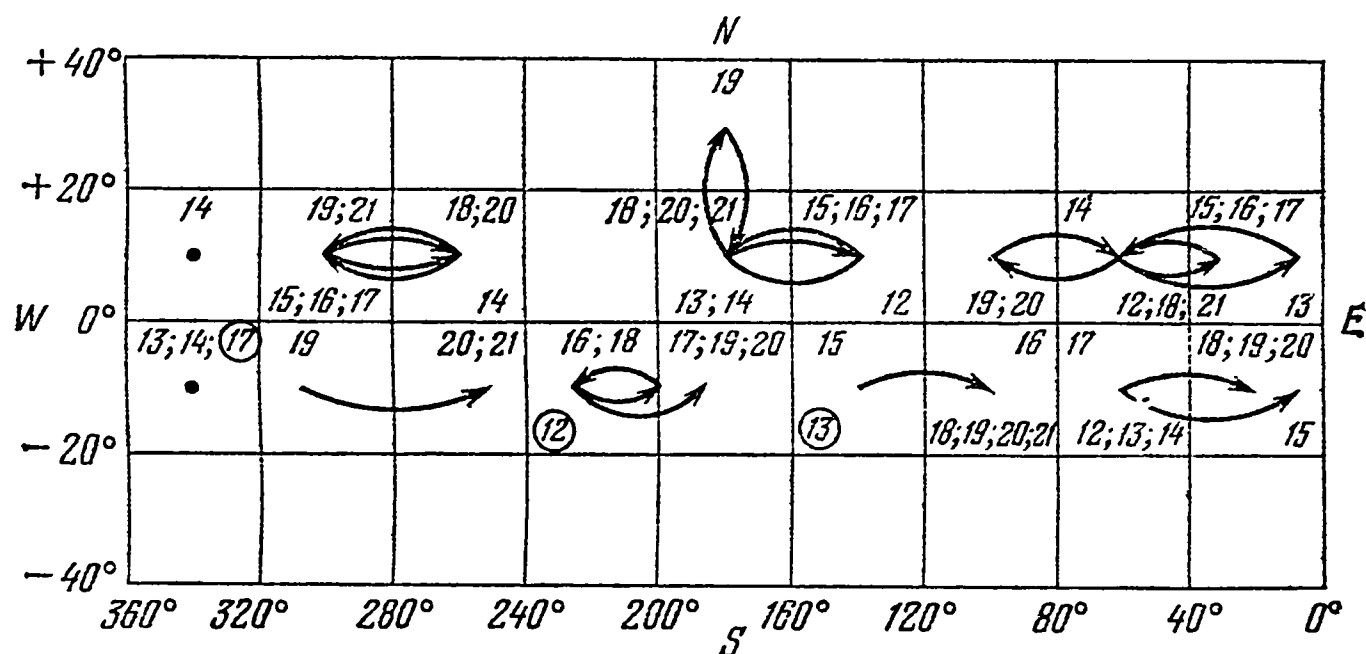


Рис. 16. Сборная карта активных долгот суммарных площадей солнечных пятен за 12-й — 21-й солнечные циклы. По оси абсцисс нанесены кэррингтоновские долготы. Цифры означают номера 11-летних циклов (по Цюриху).

Наиболее важным при изучении активных долгот является вопрос о том, насколько они устойчивы. Всерьез, да и то с определенными ограничениями во времени, его можно решить только для солнечных пятен. Поскольку северное и южное полушария Солнца, как мы уже знаем, отнюдь неравноценны в отношении солнечной активности, естественно, требуется их раздельное рассмотрение. Взгляните на рис. 16, на котором представлена сборная картина активных долгот суммарной площади пятен, выделенных методом изолиний за период с 1879 по 1976 г. Здесь по оси абсцисс нанесены кэррингтоновские гелиографические долготы, соответствующие синодическому периоду вращения 27,275 суток, а по оси ординат — гелиографические широты. Цифрами указаны номера 11-летних циклов (по Цюриху), стрелки показывают смещение центров активных долгот от цикла к циклу. Поскольку при

использовании метода изолиний масштаб по параллели составляет 40° и по меридиану 20° , смещение на эту величину нельзя считать значимым. Первое, что бросается в глаза на рисунке,— это исключительная устойчивость активных долгот, особенно в северном полушарии Солнца. Все они сохраняются не менее двух 11-летних циклов, а три из них в северном полушарии — девять (!), т. е. около ста лет.

Вторая характерная особенность активных долгот состоит в том, что они не показывают систематического сдвига в одном направлении (к западу или к востоку). Отсюда можно сделать определенные выводы о законе вращения в активных долготах. Из главы 1 этой книги вы уже знаете, что вращение Солнца, определенное, в частности, по измерениям координат солнечных пятен, является дифференциальным. Угловая скорость его различна на разных широтах и убывает с удалением от экватора. Если это так, то группы пятен, расположенные выше широты 14° , за время их существования сдвигались бы по этой причине к востоку, а лежащие ближе к экватору — к западу относительно жесткой кэррингтоновской системы долгот. Между тем активные долготы сохраняются не дни или месяцы, а десятилетия. Более того, даже если учесть дифференциальное вращение и внести соответствующие поправки в координаты пятен, затратив на это большой и, главное, неблагодарный труд, мы снова придем к тому же заключению: активные долготы упорно не хотят сдвигаться с места. Впрочем, если учесть ширину долготных интервалов и даже самую большую продолжительность жизни группы солнечных пятен, легко убедиться, что учет дифференциального вращения в данном случае является совершенно излишним.

Как же тогда понять тот факт, что активные долготы не изменяют своего положения в течение нескольких 11-летних циклов? Это означает, что в них нет дифференциального вращения или же изменение его с удалением от экватора очень сильно ослаблено. Но ведь солнечная фотосфера, как известно, вращается не жестко. Остается единственный выход из положения: считать, что активные долготы характеризуют физическое состояние более внутренних, подфотосферных слоев Солнца, которым присуще не дифференциальное, а жесткое вращение. Теоретические расчеты показывают,

что действительно, с удалением от видимой поверхности в глубь Солнца вращение довольно быстро перестает быть дифференциальным. Следовательно, активные долготы — это как бы только внешние проявления процессов, происходящих в более глубоких слоях Солнца. Вот почему их изучение приобретает особую значимость для всех, кто пытается проникнуть в сущность солнечной цикличности.

Рассмотрение сборной карты активных долгот позволяет разглядеть еще одно их свойство. Нельзя сказать, что они «стоят на якоре» вполне жестко. Они испытывают порой колебания то в одну, то в другую сторону. Но для нас самое главное, что, как следует из более детального изучения, активные долготы определенно подвержены только незначительным колебаниям, гораздо меньшим, чем ширина этих долготных интервалов. Наиболее мощные и устойчивые активные долготы пятен располагались, по крайней мере до 1976 г., в северном полушарии Солнца. Это вполне естественно, поскольку в течение последних семи 11-летних циклов активность в этом полушарии была выше, чем в южном. Величина колебаний активных долгот от цикла к циклу тем больше, чем меньше изменение уровня солнечной активности за то же время. Создается впечатление, что наиболее мощная активность связана с более глубокими слоями, которые гораздо прочнее удерживают активные долготы «на якоре».

До сих пор мы говорили только об активных долготах солнечных пятен. Но оказывается, что такие долготные интервалы могут быть выделены и для активных образований в более высоких слоях солнечной атмосферы, в частности, для кальциевых флоккулов, солнечных вспышек, локальных источников радиоизлучения, корональных конденсаций, всплесков радиоизлучения IV типа и шумовых бурь. И хотя для этих образований мы располагаем гораздо более ограниченным материалом, чем для солнечных пятен, охватывающим не более двух-трех 11-летних циклов, можно с полной уверенностью утверждать, что активные долготы являются свойством наиболее мощных активных образований. Помимо наиболее крупных групп солнечных пятен, лучше всего они выделяются для сильных (особенно протонных) вспышек, всплесков радиоизлучения IV типа и самых ярких кальциевых флоккулов. Для

количественной оценки этой особенности была введена характеристика концентрации активности в активных долготах. Она отражает быстроту нарастания активности от относительно спокойных к активным долготным интервалам, усредненную по всем активным долготам рассматриваемого индекса солнечной активности. Сравнение значений этой характеристики для различных явлений окончательно убедило исследователей Солнца в том, что чем мощнее активные образования в солнечной атмосфере, тем сильнее проявляется их расчлененность по долготе.

Рассмотрение активных долгот для образований, расположенных на разной высоте относительно видимой поверхности Солнца, привело еще к одному очень интересному заключению. Оказалось, что подавляющее большинство их совпадает с точностью до выбранного масштаба долготного интервала. Это означает, что чаще всего активные долготы как бы пронизывают всю толщу солнечной атмосферы вплоть до короны. Однако встречаются и такие активные долготы, которые свойственны только одному или некоторым из активных образований. Поэтому все активные долготы были разделены на два класса: основные, охватывающие всю атмосферу Солнца от фотосферы до короны, и вторичные, относящиеся лишь к части ее. Судя по сборной карте активных долгот суммарной площади пятен, первые являются особенно устойчивыми.

Особо выделяются активные долготы водородных волокон, обычно очерчивающих линии раздела солнечных магнитных полей разной полярности. Как правило, они располагаются между активными долготами других образований, о которых мы только что говорили.

Все еще не нашел своего решения уже более 40 лет обсуждающийся вопрос о так называемых антиподальных активных долготах. Обычно так называют активные долготы, которые отстоят друг от друга по параллели на 180° в северном и (или) южном полушариях Солнца или располагаются на одном меридиане в обоих полушариях. Первоначально считалось, что это наиболее распространенный (или даже универсальный) тип активных долгот. Дальнейшие исследования не подтвердили этих радужных надежд, хотя и не отвергли их полностью. Оказалось, что антиподальные активные долготы, разнесенные по параллели на 180° , являются

скорее исключением, чем правилом. Несколько чаще, примерно в четверти случаев, они охватывают оба полушария Солнца. И все-таки исключительный интерес к антиподальным активным долготам был далеко не безосновательным. Дело в том, что антиподальность типична для самых крупных групп солнечных пятен, которые, к сожалению, далеко не всегда расположены в активных долготах. Но зато антиподальные активные долготы отличаются особенно высокой «продуктивностью».

Итак, мы убедились в том, что «выдача» солнечной активности не одинакова в различных долготных интервалах. Если это так, естественно возникает вопрос: как проявляется в них 11-летний цикл солнечной активности? Ведь, выделяя активные долготы, мы использовали в качестве масштаба времени чаще всего 10—11 лет. Гринвичские данные о солнечных пятнах дали возможность построить кривые изменения среднегодового числа групп и их суммарной площади в каждом из долготных интервалов шириной 40° . Каждую такую кривую можно было сравнить с соответствующей кривой для всего северного и южного полушария. Основная цель этого исследования состояла в том, чтобы выяснить, все ли долготные интервалы, в частности, активные долготы, «ведут» 11-летний цикл или же в некоторых из них имеют место искажения типичной формы циклической кривой.

Для того чтобы судить о сходстве циклических кривых отдельного долготного интервала и всего соответствующего полушария, северного или южного, была введена специальная характеристика — индекс циклоподобия. При достаточном сходстве кривых этот индекс должен быть не меньше единицы. Однако оказалось, что от одного долготного интервала к другому величина индекса циклоподобия испытывает довольно большие колебания, а в некоторых случаях бывает даже отрицательной. Долготные интервалы, в которых величина индекса циклоподобия равна единице или превышает ее, т. е. интервалы, как бы «ведущие» 11-летний цикл, по аналогии с активными долготами были названы циклоподобными долготами.

Циклоподобные долготы по суммарной площади пятен выделяются гораздо более четко, чем по числу групп. Зато величина циклоподобия в общем существенно

выше для числа групп пятен и при этом испытывает гораздо меньшие колебания от одного долготного интервала к другому. Все это очень напоминает картину, с которой мы уже сталкивались при рассмотрении особенностей солнечной цикличности для всего диска. Действительно, 11-летний цикл, как мы уже знаем, лучше всего выделяется по числу групп и значительно хуже по их суммарной площади. Вот и в данном случае Солнце дает по числу групп 11-летний цикл в чистом виде почти во всех долготных интервалах. С суммарной же площадью все обстоит гораздо сложнее. В этом случае уже далеко не все долготные интервалы «ведут» цикл.

Но зато выясняется другое любопытное обстоятельство. Оказывается, циклоподобные долготы площадей пятен, как и их активные долготы, сохраняются на протяжении двух, а иногда даже нескольких 11-летних циклов. Какова же взаимосвязь циклоподобных и активных долгот? Служат ли активные долготы «дирижерами» 11-летнего цикла или же только искажают его развитие? Больше половины циклоподобных долгот не совпадают с активными, причем уровень активности в них ниже среднего. Но зато циклоподобные долготы с повышенной активностью всегда были и активными. Можно провести подобное сравнение и с другой стороны. Если взять активные долготы, которые одновременно являются и циклоподобными, то оказывается, что четыре пятых из них отличаются самыми высокими значениями индекса циклоподобия, а остальные — самым скромным вкладом в 11-летний цикл по сравнению с первыми. Однако большинство активных долгот предпочитают «портить» 11-летний цикл, отличаясь самыми малыми величинами индекса циклоподобия.

За счет чего же происходит подобное искажение циклических кривых площадей солнечных пятен? Прежде всего, оно обусловлено неодновременностью, или асинхронностью развития 11-летнего цикла во многих активных долготах. Наиболее отчетливым примером этой асинхронности служит долготный интервал $40 - 0^\circ$ северного полушария в 18-м цикле солнечных пятен, который дал максимум суммарной площади в 1951 г., т. е. через 4 года после эпохи максимума чисел Вольфа, и тем самым задержал спад активности на циклической кривой для всего Солнца. Таких при-

меров можно привести много. Все они в большей или меньшей степени объясняют сильные флуктуации и вторичные максимумы 11-летних солнечных циклов. Интересно, что в долготных интервалах, которые не являются ни активными ни циклоподобными, в среднем асинхронность циклических кривых такая же, как у активных долгот с низким циклоподобием. Но поскольку их вклад в 11-летний цикл заметно уступает вкладу последних, они не в состоянии заметно исказить ход этого цикла.

Не менее интересен вопрос о более кратковременных изменениях в активных долготах в пределах 1—3 лет. Мы уже говорили о колебаниях активных долгот от цикла к циклу относительно среднего их положения. Оказалось, что существуют также более кратковременные колебания их подобного рода с периодами 20—30 солнечных оборотов, которые, между прочим, не кратны 11-летнему циклу. Все попытки обнаружить какие-либо регулярные изменения уровня солнечной активности с периодом до двух с половиной лет в отдельных долготных интервалах, в частности, в активных долготах, закончились безрезультатно. При этом оказалось, что Солнце в целом ведет себя «гораздо правильнее», чем отдельные активные долготы. Зато изменение со временем уровня активности в некоторых парах активных долгот происходит практически одинаково, с отставанием (или опережением) на 18—23 солнечных оборота, а иногда и без сдвига во времени. Скорее всего, первое может быть обусловлено существованием в подфотосферной зоне Солнца очень длинных бегущих волн, а второе — стоячими волнами. Конечно, подобного рода исследования активных долгот пока еще нельзя рассматривать иначе, как «первую пробу пера». Но и она оказалась многообещающей.

3. Активные долготы и магнитные поля

Наше рассмотрение активных долгот было бы неполным, если бы мы специально не остановились на долготном распределении солнечных магнитных полей, составляющих основу солнечной активности. Сильные магнитные поля связаны с солнечными пятнами. Поэтому, говоря об активных долготах солнечных пятен, мы

тем самым, в сущности, сказали практически все об активных долготах сильных магнитных полей. Следует только лишний раз подчеркнуть, что именно в таких долготных интервалах вращение Солнца оказывается не дифференциальным, а жестким (или почти жестким).

Совсем другое дело слабые магнитные поля, которые иногда не совсем правильно называют фоновыми. Эти поля, измеряемые с помощью солнечного магнитографа и поэтому усредненные по большой площади солнечной фотосферы (см. главу 1), считают «освобожденными» от магнитного поля солнечных пятен. Тем не менее, оказывается, что именно в местах активных областей (т. е. сильного магнитного поля) они, как правило, имеют напряженность на порядок более высокую, чем вне их. Поэтому либо такое исключение все же не может считаться полным, либо слабые магнитные поля тесно взаимосвязаны с сильными. Но тогда в обоих случаях их, строго говоря, нельзя считать фоновыми.

Мы уже знаем, что слабые магнитные поля одной полярности имеют обыкновение группироваться. Наиболее простой формой такой группировки служат сечения, которые обычно охватывают одну или несколько активных областей. Их легко обнаружить, если синоптическую карту слабых полей за солнечный оборот разрезать вблизи экватора на полосы между широтами $\pm 20^\circ$ и $\pm 20-40^\circ$. В эпоху максимума число таких сечений на низких широтах достигает 15, к минимуму 11-летнего цикла оно заметно уменьшается. Рассматривая временные последовательности сечений, можно заметить, что они постепенно укрупняются и затем снова уменьшаются, создавая ряды. Время существования ряда достигает 10 солнечных оборотов. Судя по наклону рядов к временной оси, можно считать, что на низких широтах (до $\pm 20^\circ$) их период вращения равен 27 суткам, а на более высоких — 28—29 суткам. В свою очередь, нередко, особенно на ветви спада 11-летнего цикла солнечной активности, соседние ряды противоположной полярности образуют непрерывные потоки. В потоках одна из полярностей является преобладающей. Время их существования равно 2—3 годам. Еще дольше сохраняются устойчивые сверхгигантские регулярные структуры слабых магнитных полей,

охватывающие долготные интервалы до 100° . Такие структуры обычно выделяются при раздельном рассмотрении полей северной и южной полярности. Характерной особенностью слабых магнитных полей является преобладание в них одной полярности. В 19-м и 20-м циклах преобладающей была южная (или отрицательная) полярность. Экватор Солнца, в отличие от областей сильного магнитного поля, не служит помехой для крупных структур слабого поля. Они свободно пересекают его в ту или другую сторону. Все это приходится учитывать при рассмотрении вопроса о долготном распределении слабых магнитных полей.

Уже из этого чисто качественного описания видно, что по крайней мере на ветви спада 11-летнего цикла в отдельных долготных интервалах имеются устойчивые структуры слабого магнитного поля, сохраняющиеся несколько лет. Для более детального изучения были построены карты распределения магнитных полей одной полярности с помощью уже знакомого нам метода изолиний. К сожалению, возможности для исследования этих полей еще меньшие, чем для изучения долготного распределения хромосферных и корональных активных образований. И тем не менее, они позволили выяснить, пожалуй, самые животрепещущие стороны интересующего нас вопроса.

Прежде всего было установлено, что активные долготы слабых магнитных полей реально существуют, причем наиболее четко они выделяются для полей преобладающей полярности. С точностью до масштаба по долготе самые мощные из них совпадают с основными активными долготами и являются общими для полей обеих полярностей. Но на этом и заканчивается сходство активных долгот слабых магнитных полей с активными долготами других индексов солнечной активности. Как и следовало ожидать, они располагались асимметрично относительно экватора Солнца. Устойчивость активных долгот слабых магнитных полей оказалась очень скромной. Только одна из них «выжила» в течение 19-го и 20-го циклов, остальные же либо исчезли, либо сильно сместились по долготе. Если в 19-м цикле такие долготные интервалы были выделены и в северном и в южном полушариях Солнца, то в 20-м цикле они находились преимущественно в северном полушарии. Дополнительным свидетельством изменчивости

долготного распределения слабых магнитных полей может служить безуспешность попытки выделения сверхгигантских магнитных структур, которые отчетливо были видны на ветви спада 19-го цикла, в следующем 20-м цикле.

Наконец, степень концентрации активности в активных долготах слабых полей самая низкая по сравнению с другими активными образованиями. Итак, мы пришли к довольно печальному итогу: слабые магнитные поля нельзя рассматривать в качестве основы активных долгот, хотя они и вносят в эти долготные интервалы некую скромную лепту. Впрочем, это не так уж и удивительно, если вспомнить, что активные долготы характерны прежде всего для мощных активных образований.

В начале 70-х годов некоторые исследователи Солнца, исходя из обнаруженной ими взаимосвязи между протонными вспышками и корональными конденсациями, с одной стороны, и соответствующими их появлению особенностями конфигурации слабых магнитных полей, с другой, пришли к заключению, что именно эти поля «диктуют условия» пространственно-временному изменению солнечной активности. Однако эта концепция оказалась очень уязвимой. Действительно, только что полученный нами вывод о характере долготного распределения слабых магнитных полей определенно противоречит такому заключению. К тому же хорошо известно, что если эти поля и оказывают какое-то влияние, то скорее на стадии ослабления активности. Немаловажно также, что слабым полям даже в их активных долготах, видимо, все же присуще дифференциальное, а не жесткое вращение. Об этом свидетельствует различие синодических периодов вращения их рядов на низких и более высоких широтах, о которых уже говорилось в этом разделе, а также сильное смещение их активных долгот от цикла к циклу. Если рассматривать картину долготного распределения солнечных магнитных полей в целом, то становится ясным, что области сильных и слабых магнитных полей как бы взаимно дополняют друг друга. Поэтому с учетом всего сказанного следует считать сильные магнитные поля главным «дирижером» долготного распределения солнечной активности.

4. Активные долготы и солнечные циклы

Случилось так, что активные долготы не сразу вписались в общую картину солнечной цикличности. В этом смысле закону Шперера повезло гораздо больше. Открытый вскоре после того как утвердился в своей силе закон Швабе — Вольфа, он сразу же занял достойное место в описании 11-летнего цикла солнечной активности. Что же касается активных долгот, то они утвердились более чем через сто лет после начала изучения солнечных циклов. Поэтому их долгое время считали лишь некоторым «приложением» к данной проблеме. Это нашло свое отражение даже в теориях солнечной цикличности, которые обычно не считали нужным объяснить активные долготы, тем самым относя их к фактам второстепенного значения. Более того, в этих теориях, как правило, производилось усреднение физических характеристик Солнца по всем долготам.

Но при таком подходе сразу же бросается в глаза отсутствие четкой логической линии. Действительно, если при изучении 11-летнего цикла считают нужным учитывать закон Шперера, т. е. пространственный аспект этого цикла, и даже при рассмотрении 80—90-летнего цикла специально принимается во внимание его изменение, то почему следует пренебрегать особенностями долготного распределения солнечной активности, которое является второй составляющей этого пространственного аспекта? В последние годы исследователи Солнца стали задумываться над данной проблемой и это уже принесло свои первые плоды.

Прежде чем перейти непосредственно к полученным результатам, напомним, что в то время как 11-летний цикл определяется прежде всего частотой (или числом) явлений солнечной активности безотносительно к их мощности, 80—90-летний цикл обусловлен главным образом мощностью этих явлений. Но, как мы уже знаем, активные долготы «населены» прежде всего самыми мощными активными образованиями. Следовательно, лучше всего они должны себя проявлять не в 11-летнем, а в 80—90-летнем цикле. В этом можно было убедиться, читая раздел 2 данной главы. В самом деле, из него мы узнали, что только в некоторых случаях активные долготы помогают формировать кривую 11-летнего цикла в том виде, какой она имеет для

всего северного или южного полушария Солнца. Гораздо чаще они «портят» ее, вызывая сильные флуктуации или вторичные максимумы в этом цикле. В этом смысле активные долготы выступают как антипод закона Шперера. Действительно, в 11-летнем цикле закон Шперера одинаково проявляется во всех долготных интервалах. Но зато в тех случаях, когда он себя показывает наиболее ощутимо, как бы в своей классической форме, активные долготы выделяются очень плохо. Итак, 11-летний цикл не служит основным объектом воздействия активных долгот. Поэтому теоретики, создавшие гипотезы не всей солнечной цикличности, а только 22-летнего солнечного цикла, по-своему были правы, не заботясь об учете в них существования активных долгот.

Обратимся теперь к 80—90-летнему циклу солнечной активности, который больше всего испытывает на себе воздействие активных долгот. Оказалось, что наиболее четко активные долготы выделяются именно в эпоху его максимума, а хуже всего — в эпоху минимума. Число больших групп солнечных пятен в них изменяется параллельно с ходом этого цикла. Вблизи эпох его экстремумов степень концентрации активности в активных долготах испытывает самые большие вариации, тогда как в остальное время она остается постоянной. С 80—90-летним циклом тесно связаны и колебания этих долготных интервалов относительно их среднего многолетнего положения. Они минимальные в эпоху его максимума и самые большие — в эпохи минимума. Наконец, косвенно воздействие активных долгот на вековой цикл сказывается в том, что изменение величины индекса циклоподобия происходит параллельно с ходом этого цикла. Итак, активные долготы как бы «ведут» 80—90-летний цикл. И в этом смысле они оказываются противоположными закону Шперера. Можно сказать, что 80—90-летний цикл занимается его «порчей», которая выражается в том, что вблизи эпохи максимума этого цикла «бабочки» Маундера становятся более широкими и размытыми и величина изменения средней широты солнечных пятен за 11-летний цикл заметно уменьшается.

Дополнительный свет на природу 80—90-летнего цикла солнечной активности проливает характер ослабления дифференциальности вращения Солнца в актив-

ных долготах. Как мы уже знаем, жесткое (или почти жесткое) вращение, строго говоря, характерно только для эпохи максимума этого цикла и присуще определенному подфотосферному слою. Поэтому отклонения активных долгот от их многолетнего среднего положения от одного 11-летнего цикла к другому можно трактовать как изменения со временем глубины конвективной зоны Солнца. Такая трактовка дает некий ключ к объяснению 80—90-летнего цикла в дополнение к общему рассуждению об изменении физических условий в этом слое.

Таким образом, мы убедились в том, что активные долготы никак нельзя рассматривать как «инородное (или второстепенное) тело» в общей картине солнечной цикличности. Они являются ее важной неотъемлемой частью и поэтому обязательно должны учитываться в современных теориях солнечной активности.

5. Активные долготы и секторная структура межпланетного магнитного поля

Когда космические аппараты впервые позволили уловить солнечный ветер, непрерывно «дующий» из солнечной короны со скоростью в несколько сотен километров в секунду, выяснилось, что он несет с собой оттуда и магнитное поле, хотя и очень ослабленное. Вблизи орбиты Земли его напряженность равна $5 \cdot 10^{-5}$ Гс. Из-за вращения Солнца радиально направленные силовые линии этого межпланетного магнитного поля принимают форму архимедовых спиралей. Если они выходят из Солнца в плоскости эклиптики под углом примерно 60° к западу от линии Солнца — Земля, то они пересекают Землю. Оказалось, что на ветви спада 19-го цикла солнечной активности такое поле разделено на четыре устойчивых сектора противоположной преобладающей полярности. Эту секторную структуру при смещении межпланетного поля на 4,5 суток удалось связать с усредненным слабым магнитным полем Солнца. Любопытно, что подобно слабым солнечным полям на низких широтах секторная структура межпланетного поля повторялась с периодом 27 суток. Вскоре была обнаружена тесная связь между границами секторов и местами появления мощных явлений солнечной активности, в частности, протонных вспышек и

корональных конденсаций. Вот тогда и возник вопрос, не является ли секторная структура межпланетного магнитного поля просто отражением существования активных долгот на Солнце. Хотя эта идея была очень привлекательной, дальнейшее изучение межпланетного поля показало, что дело обстоит совсем не так просто, как это показалось сначала.

Наблюдения секторной структуры в 19-м и 20-м циклах солнечной активности заметно усложнили ее общую картину. Правда, было подтверждено существование устойчивых четырех секторов межпланетного магнитного поля противоположной полярности, причем оказалось, что они сохраняются в течение большей части 11-летнего цикла. Более того, благодаря тесной их связи с геомагнитной активностью удалось установить, что они существовали по крайней мере пять 11-летних циклов. Вместе с тем границы их смещаются с ходом этого цикла: к западу на его ветви роста и к востоку на ветви спада. Такое смещение очень медленное и не превышает 20° в год. Было также обнаружено, что на устойчивую четырехсекторную структуру с синодическим периодом вращения 27 суток накладывается дополнительная структура с полем, направленным к Солнцу, которая простирается по долготе примерно на 100° и имеет период вращения 28—29 суток. Она особенно отчетливо видна в течение нескольких лет вблизи эпохи максимума 11-летнего цикла и затем исчезает на его ветви спада. Таким образом, секторная структура межпланетного магнитного поля претерпевает заметные изменения в ходе даже одного 11-летнего цикла солнечной активности, причем число секторов в ней изменяется по крайней мере от двух до четырех. В этом смысле она, пожалуй, сродни слабым солнечным магнитным полям.

За последние годы было выполнено немало работ по сравнению секторной структуры межпланетного поля со слабыми солнечными полями, которые показывают, что именно униполярные магнитные области лучше всего согласуются с расположением этих секторов и что, подобно им, секторы нередко пересекают экватор Солнца и наиболее устойчивы на ветви спада 11-летнего цикла солнечной активности. Это и не удивительно, так как именно из таких областей с «открытой» конфигурацией магнитного поля, в отличие от актив-

ных областей, отличающихся замкнутой его конфигурацией, магнитное поле Солнца может уноситься в межпланетное пространство. Таким образом, секторная структура межпланетного магнитного поля, как и слабые солнечные поля, скорее оттеняет активные долготы, чем выделяет их.

Однако остается одно немаловажное обстоятельство, которое заслуживает особого рассмотрения. Дело в том, что границы секторов межпланетного поля очень узки. Чаще всего они охватывают не более одних суток, т. е. примерно 13° по долготе. Активные долготы, как мы знаем, гораздо шире: они охватывают $30\text{—}40^\circ$. Именно такие отклонения от секторных границ и отмечают у протонных вспышек и корональных конденсаций. Тогда напрашивается вывод, что все же границы секторов межпланетного поля как-то связаны с активными долготами. Более детальное рассмотрение показало, что наиболее эффективными оказываются «хейловские» секторные границы, т. е. границы, которые соответствуют переходу от ведущей к последующей магнитной полярности для зоны пятнообразования полушария Солнца с преобладающей активностью в данном 11-летнем цикле. Если учесть это обстоятельство, то появляется лучшая возможность отождествления именно этих границ с основными активными долготами.

И тем не менее было бы заблуждением считать, что секторная структура межпланетного магнитного поля и долготная расчлененность областей сильных солнечных магнитных полей только взаимно дополняют друг друга. В изучении трехмерной крупномасштабной структуры межпланетного поля сделаны только первые шаги. Трудно сказать, насколько сохранится в будущем ныне привычная для нас ее картина. Поэтому, скорее, здесь мы имеем дело со взаимным переналожением долготных распределений сильных и слабых солнечных магнитных полей, которое и позволяет в некоторых случаях отождествлять границы секторов межпланетного магнитного поля с активными долготами на Солнце.

Остается сказать несколько слов о роли корональных дыр в связи с рассматриваемым нами вопросом. Поскольку они характеризуются магнитным полем одной полярности и обычно «соседствуют» в низких широтах с корональными конденсациями (см. раздел 8

главы 2), можно было бы предполагать, что их границы нередко совпадают с секторными границами. Однако корональные дыры, даже на ветви спада 11-летнего цикла, не столь многочисленны, чтобы располагаться во всех секторах. Более того, на сравнительно низких широтах они обладали слишком скромными размерами, чтобы целиком заполнить сектор межпланетного поля. Поэтому корональные дыры в какой-то мере могут использоваться лишь для выделения пассивных долгот как антипода активных.

Глава 6

ГИПОТЕЗЫ О ПРОИСХОЖДЕНИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

1. Три типа гипотез о солнечной активности

Пожалуй, самый интригующий из всех вопросов, которые возникают при изучении Солнца, можно сформулировать следующим образом: «Откуда берется солнечная активность и каким образом она сводится к тем особенностям, о которых мы говорили в этой книге?» Если бы на этот вопрос можно было бы дать сколько-нибудь вразумительный ответ, человечество могло бы по праву считать себя по крайней мере хозяином своей планеты. К сожалению, до сих пор не создано единой теории солнечной активности, которая могла бы достаточно полно и хотя бы без явно видимых противоречий дать ответ на поставленный здесь вопрос. И все же сейчас мы уже имеем дело не просто с множеством отдельных работ по определенным проблемам солнечной активности, а с вполне определенными моделями солнечных циклов, хотя и не всеобъемлющими. Тем не менее, автор воздержался бы от того, чтобы называть их теориями. Это скорее гипотезы, которые пока ждут своего подтверждения.

Вся более чем столетняя история поиска причин и механизмов циклов солнечной активности представляет собой борьбу трех типов гипотез, основное различие (даже скорее противоречие) которых состоит в ответе на вопрос, где возникает солнечная активность,— на Солнце или вне его. На первый взгляд может показаться, что здесь и думать-то не над чем: раз активность

солнечная, значит, и возникает она на Солнце. Но так стали считать совсем недавно.

А началось все еще в середине прошлого столетия с гипотезы, которая была выдвинута самим Р. Вольфом. Согласно этой точке зрения солнечная активность вызывается планетами Солнечной системы, точнее, их приливным воздействием на Солнце. Такая гипотеза имела под собой некую почву. Ведь период обращения Юпитера вокруг Солнца (11,7 года) поразительно близок к средней длине цикла солнечной активности (11,1 года), а длина и высота этого цикла изменяется со временем далеко не хаотически. Высокий авторитет Вольфа более чем на полстолетия привлек внимание многих ученых, в том числе блестящих математиков-статистиков, к разработке именно этой гипотезы. И сводилась она преимущественно к поискам периодов, взаимное наложение которых могло бы объяснить кривую изменения относительных чисел солнечных пятен. Это принесло большую пользу, но только не физике Солнца, а математике. И дело все в том, что рассуждения, которые выдвигались для обоснования гипотезы планетной обусловленности солнечной активности, были исключительно эмпирико-статистическими. Ни о каких строгих физических расчетах не было и речи.

Но вот в 1926 г. норвежский метеоролог В. Бьеркнесс выдвинул гипотезу, согласно которой солнечная активность создается в подфотосферном слое Солнца вихревыми кольцами. Было бы излишним излагать здесь эту гидродинамическую модель солнечного цикла, тем более, что мы не собираемся рассматривать гипотез, которые уже потеряли свое значение (кроме исторического). Однако нельзя не сказать, что это была первая физическая гипотеза о происхождении солнечной цикличности, автор которой не побоялся «бросить перчатку» самому маститому Вольфу (точнее, его авторитету, сохранявшемуся десятилетия даже после его смерти). К сожалению, Бьеркнесс не был астрономом, и поэтому о его модели вспомнили только после того, как Вальдмайер выдвинул свою «эруптивную» гипотезу 11-летнего цикла, о которой уже говорилось в главе 4. Но если Вальдмайер переместил причину солнечной активности извне внутрь самого Солнца, то Бьеркнесс не только сделал это, и притом почти на десять лет

раньше, но и указал ее физическую суть. Таким образом, в первой половине нынешнего столетия появился новый тип гипотез о происхождении солнечной активности, который искал ее источник не вне Солнца, а в его недрах.

Однако когда, вопреки Вальдмайеру, оказалось, что 11-летние циклы солнечной активности (и даже 22-летние) нельзя считать полностью изолированными друг от друга, сторонники концепции Вольфа вновь воспрянули духом. Но теперь они уже понимали, что без физических обоснований и без самого Солнца им не обойтись. И вот тогда появился еще один тип гипотез о происхождении солнечной цикличности, который автор назвал бы промежуточным (или гибридным). Согласно гипотезам этого типа, сами планеты не могут создавать солнечную активность, они только стимулируют ее появление, как бы служат ее спусковым механизмом. Исходные же ее причины лежат в самом Солнце или за пределами Солнечной системы, например, в Галактике (последнее без надежных физических доказательств). Но нельзя обойтись без учета влияний планет для объяснения всех особенностей солнечной активности. Следовательно, надо пытаться обосновать реальность таких влияний. Именно этому вопросу и уделяли больше всего внимания сторонники промежуточного типа моделей солнечных циклов.

И все же старый груз тянул их в сторону математической статистики. Если они и занимались физическими расчетами, то чаще всего такие расчеты свидетельствовали не в их пользу. В частности, оказалось, что приливное воздействие планет на Солнце не в состоянии увеличить его радиус больше, чем на 1 мм. Ничтожно малым получилось и влияние отклонения положения центра Солнца от положения центра масс Солнечной системы. Еще труднее надежно доказать, что поверхностные слои Солнца в состоянии колебаться в резонансе с гравитационным воздействием планет. Правда, было выяснено, что расположение планет может как-то сказываться на распределении активных областей в солнечной атмосфере. Но и этот эффект сами обнаружившие его исследователи не считают решающим. Короче говоря, точка зрения в данном случае такова: хотя Солнце само «виновато» в своей активности, но без планет не обойтись.

И хотя последний тип гипотез о происхождении солнечной цикличности, явно тяготеющий к первому, все еще продолжает привлекать внимание (правда, в основном любителей астрономии), особенно сильное развитие за последние десятилетия получила разработка моделей, связанных непосредственно с процессами, происходящими внутри самого Солнца. Прежде чем перейти к их рассмотрению, стоит упомянуть еще об одной гипотезе, которая при всей ее экстравагантности не лишена смысла, тем более, что она, в отличие от других гипотез внешнего происхождения солнечной активности, имеет физическое обоснование. Известно, что, в отличие от других планет Солнечной системы, Юпитер выделяет из своих недр значительную энергию и в этом отношении больше напоминает звезду, чем планету. Так вот, если допустить, что когда-то Солнце и Юпитер составляли единую физически двойную звездную систему, то можно полагать, что солнечная активность, и особенно ее средний период,— эта та память, которую Юпитер оставил Солнцу, дабы оно «никогда не забывало о былом их родстве». Конечно, это очень любопытная гипотеза. И все же к ней понадобится обратиться только в том случае, если само наше дневное светило не позволит нам объяснить сущность солнечной активности.

Поскольку, как мы уже знаем, на Солнце очень важную, если не определяющую роль играют магнитные поля, чисто гидродинамическая модель солнечной активности не могла выдержать испытания временем. И действительно, более 35 лет назад появилась первая магнитогидродинамическая гипотеза о происхождении солнечных циклов. Она же поставила перед сторонниками внутренней обусловленности солнечной активности еще один вопрос: в каком именно месте в Солнце расположен ее источник? Бьеркнесс считал, что он находится в подфотосферной зоне. Создатель первой магнитогидродинамической модели солнечной активности, основоположник космической электродинамики шведский ученый Х. Альвен, как истинный творец нового направления, начал с того, что отказался от всего (в том числе и ценного) внесенного в эту проблему гидромеханиками, и поместил источник солнечной активности в ядро Солнца, которое он считал конвективным.

В дальнейшем эта гипотеза подверглась ожесточенной критике за произвольность многочисленных допущений, лежащих в ее основе. Ныне от нее ничего не осталось, кроме магнитогидродинамических волн, или волн Альвена*), привлекаемых к объяснению многих явлений солнечной активности. Но в данной модели впервые были применены к Солнцу принципы магнитной гидродинамики и тем самым положено начало новому этапу в физических исследованиях нашего дневного светила.

Все же дальнейшая разработка магнитогидродинамических гипотез о происхождении солнечной цикличности пошла не по этому пути. Создатели их вновь обратились к подфотосферной конвективной зоне как источнику солнечной активности. Основное содержание таких гипотез и наиболее полной из них, названной ее авторами динамо-теорией солнечного цикла, будет детально рассмотрено в следующем разделе. Пока же мы ограничимся только несколькими замечаниями по поводу этих моделей. Хотя самая ранняя из них, модель американского исследователя Солнца Х. Бэбкока, является чисто феноменологической, она охватывает наиболее широкий круг явлений в солнечной атмосфере. Поэтому она послужила основой не только для динамо-теорий солнечных циклов, но и для позднее разработанной австралийским астрофизиком Дж. Пиддингтоном противоположной ей точки зрения. Это обстоятельство и определило поразительную живучесть модели Бэбкока. Вот уже тридцать лет она сохраняет свою силу в самых главных своих положениях, хотя и подверглась естественному уточнению в некоторых деталях.

В дальнейшем разработка подобного рода моделей солнечного цикла становилась все более математической и в конечном итоге свелась к строгому решению уравнений магнитной гидродинамики в линейном приближении. А в самое последнее время делаются попытки устранить и эту ее нестрогость.

*) Согласно Альвену, магнитогидродинамические волны — это колебания магнитных силовых линий, представляющих собой своего рода «овеществленные» струны, к которым «приклеена» проводящая жидкость.

2. Динамо-теории солнечных циклов

Как уже отмечалось в предыдущем разделе, за последнее десятилетие наиболее детально были разработаны динамо-теории солнечных циклов, основная цель которых состояла в том, чтобы показать, как в условиях высокой электропроводности, присущих солнечной плазме, может генерироваться крупномасштабное магнитное поле Солнца. Однако это лишь самая общая задача таких моделей. Если же говорить точнее, то они должны дать удовлетворительное объяснение основных свойств солнечной активности, которые, судя по тому, что уже узнал из этой книги читатель, вкратце сводятся к следующему:

1) для числа групп солнечных пятен выполняются законы Швабе — Вольфа и Шперера;

2) угловая скорость вращения (по крайней мере атмосферы) Солнца максимальна на экваторе и постепенно убывает к полюсам, т. е. для нашего дневного светила характерно дифференциальное вращение;

3) магнитные поля ведущего и хвостового пятен групп имеют противоположную полярность в северном и южном полушариях Солнца; эта полярность изменяется на противоположную при переходе от одного 11-летнего цикла к другому;

4) полярное магнитное поле Солнца меняет свою полярность на противоположную вблизи эпохи максимума 11-летнего цикла;

5) ведущие пятна групп обычно отличаются большими размерами и существуют дольше, чем хвостовые; как правило, они расположены ближе к экватору Солнца, причем угол наклона оси групп к экватору возрастает с удалением от него;

6) наиболее крупные группы солнечных пятен нередко появляются вновь в тех долготных интервалах, в которых они уже были замечены ранее, т. е. существуют активные долготы пятен;

7) в хромосфере наблюдаются спиральные «вихри», направление которых чаще всего не совпадает с направлением силовых линий магнитного поля в этих областях;

8) появление биполярных магнитных областей лежит в основе развития групп пятен и активных областей; однако иногда они не связаны с другими видами

активных образований, в особенности, когда они слабые и расположены у полюсов Солнца;

9) при возрастании напряженности магнитного поля этих областей сначала появляются факельные площадки, а затем солнечные пятна, которые исчезают в обратном порядке по мере увеличения площади магнитных областей и ослабления напряженности их поля;

10) водородные волокна и протуберанцы обычно существуют лишь над старыми магнитными областями, разделяя их на две части с полями противоположной полярности.

Модель Бэбкока явилась первой из таких теорий, хотя и не содержала решения уравнений магнитной гидродинамики и даже не пыталась их решать. Она была лишь достаточно широким обобщением наблюдений Солнца с применением известных к началу 60-х годов теоретических разработок. В частности, случилось так, что она вобрала в себя и идеи «зачинателя» динамо-теорий солнечных циклов американского астрофизика Е. Паркера. В этом смысле модель Бэбкока была не только предтечей, но и первой из моделей подобного рода, хотя ее создатель своей статье, содержащей ее изложение, дал очень скромное название: «Топология магнитного поля Солнца и 22-летний цикл».

Как мы уже знаем (см. раздел 4 главы 1), магнитное поле Солнца состоит из двух составляющих: более сильного тороидального (или азимутального) поля, вытянутого вдоль параллелей и в основном расположенного ближе к солнечному экватору, и полоидального поля, вытянутого вдоль меридианов и расположенного в полярных областях. Считают, что полоидальное магнитное поле дипольного характера является отражением его общего поля. Мы уже говорили о высокой электропроводности солнечной плазмы. Эта особенность накладывает свой отпечаток на ее взаимодействие с магнитным полем. Даже вблизи солнечной фотосферы электропроводность в принципе можно считать бесконечно большой. А если это так, то магнитный поток через любой проводящий контур большого размера (что характерно для Солнца) не изменяется практически в течение бесконечно большого интервала времени. Если этот поток изображен в виде трубки магнитных силовых линий, то можно сказать, что силовые линии «вморожены» в проводящую среду. Таким образом, движение

солнечной плазмы увлекает за собой и магнитные силовые линии, и если линия проходит через какие-то массы плазмы, то она будет проходить через них и в дальнейшем. Вмороженность приводит к тому, что магнитное поле усиливается при сжатии плазмы и ослабляется при ее расширении.

Согласно гипотезе Бэбкока, общее магнитное поле Солнца представляет собой диполь с силовыми линиями, расположенными в меридиональных плоскостях между широтами $\pm 55^\circ$ под видимой поверхностью на глубине не более 30—80 тысяч километров. На низких широтах они находятся ближе к солнечной фотосфере, вблизи северного полюса выходят наружу до расстояния в несколько солнечных радиусов и затем входят внутрь Солнца вблизи его южного полюса. Вследствие дифференциального вращения Солнца на сравнительно низких широтах силовые линии полоидального поля вытягиваются в довольно тонкие спирали вдоль параллелей по обе стороны от экватора, и таким образом в «королевских зонах» это поле превращается в тороидальное. В результате поле усиливается, причем степень этого усиления зависит от широты. Когда напряженность магнитного поля достигает в какой-то части спирали критической величины, равной, согласно Бэбкоку, 250 Гс, там создается неустойчивость. Вследствие того, что в магнитной области плотность вещества меньше, чем в окружающей среде, на эту область начинает действовать сила, которая приводит к ее всплыванию. Кроме того, скручивание магнитных силовых трубок (которое может вызываться искажениями, создаваемыми переносом энергии вещества на поверхность постоянной угловой скорости) тоже усиливает поле и делает их неустойчивыми. В итоге образуются петли, которые при напряженности поля около 1000 Гс всплывают над видимой поверхностью Солнца. Так возникают биполярные магнитные области (рис. 17).

Критическое значение напряженности поля достигается примерно через три года после закручивания магнитных силовых линий вдоль параллелей на широтах $\pm 30^\circ$, т. е. именно там, где обычно появляются первые солнечные пятна нового 11-летнего цикла. По мере развития цикла эта критическая величина может быть достигнута на все более близких к экватору Солнца широтах, в соответствии с законом Шперера. Бэбкок,

а затем чехословацкий астрофизик М. Копецкий вывели уравнение, связывающее широту, на которой получается критическое значение напряженности поля, с фазой 11-летнего цикла. Оно дает результаты, очень неплохо согласующиеся с наблюдениями.

После появления биполярной магнитной области вследствие дифференциального вращения Солнца она

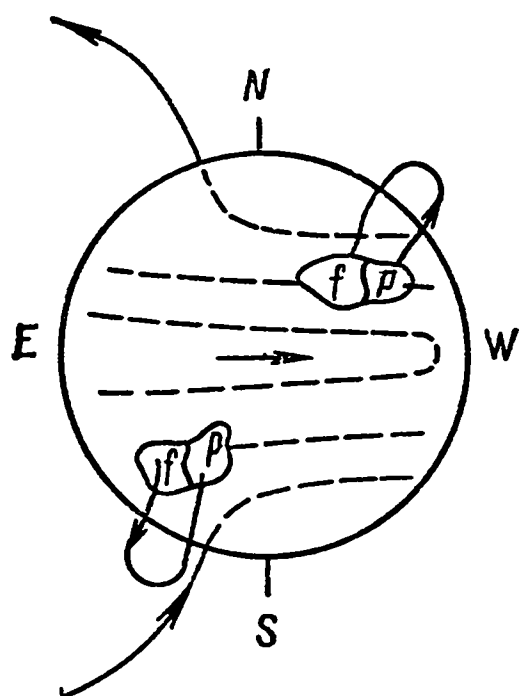


Рис. 17. Возникновение биполярных магнитных областей по гипотезе Х. В. Бэбкока. Штриховые линии показывают направление силовых линий подфотосферного тороидального магнитного поля, образованного из полоидального поля (p —ведущая, f —последующая часть области).

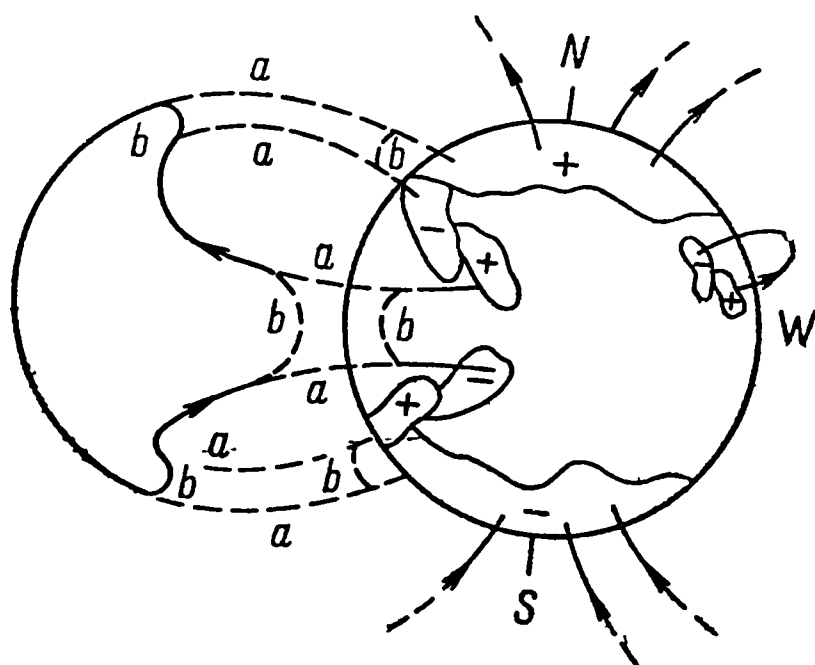


Рис. 18. Обращение знака полоидального магнитного поля по гипотезе Х. В. Бэбкока. Силовые линии старых магнитных полей расширяются. В результате их взаимодействия с полоидальным полем участки линий a заменяются участками b и поле частично нейтрализуется. В конечном итоге происходит обращение знака поля.

движется вперед по отношению к магнитной силовой трубке, расположенной под фотосферой. Благодаря этому напряженность поля в ведущей части области выше, чем в хвостовой части. Вот почему обычно ведущее пятно группы преобладает над хвостовым. Постепенно магнитная область расширяется, но при этом ее ведущая часть всегда остается более устойчивой и сильной. По мере расширения области ее магнитные силовые линии движутся наружу в общее поле Солнца. При этом они то соединяются, то разъединяются, и следовательно, такой процесс неизбежно связан с нейтрализацией какой-то части общего поля. Ведущие час-

ти биполярных магнитных областей расширяются к экватору, тогда как хвостовые смещаются к полюсам. В результате вблизи экватора происходит нейтрализация ведущих частей биполярных магнитных областей, а вблизи полюсов объединение их хвостовых частей постепенно создает новое полоидальное поле Солнца противоположной полярности (рис. 18). Согласно расчетам Бэбкока такое смещение к полюсам хвостовых частей разрушающихся биполярных магнитных областей может произойти за первые несколько лет 11-летнего солнечного цикла. Поэтому изменения полярности общего магнитного поля Солнца следует ожидать не в эпоху минимума 11-летнего цикла, а скорее в эпоху его максимума. Более того, такое объяснение вполне допускает, что обращение знака поля в северном и южном полушариях Солнца может происходить не одновременно.

Таким образом, гипотеза Бэбкока объясняет закон Шперера, закон изменения полярности магнитного поля солнечных пятен при переходе от одного 11-летнего цикла к другому, обращение знака общего магнитного поля Солнца и расширение биполярных областей при их разрушении. К сожалению, она, в сущности, не рассматривает вопрос об источнике энергии, поддерживающей дифференциальное вращение Солнца. А ведь дифференциальное вращение в этой гипотезе имеет ключевое значение. Подход к решению этого вопроса был найден сравнительно недавно. Оказалось, что таким источником вполне может быть конвекция в подфотосферном слое. И в настоящее время вряд ли можно найти гипотезу о происхождении солнечной цикличности, которая бы столь полно использовала все имеющиеся данные наблюдений солнечной активности, как гипотеза Бэбкока.

Следующий важный шаг в создании динамо-теорий солнечных циклов сделал американский астрофизик Р. Лейтон. В отличие от Бэбкока, удовлетворившегося построением чисто качественной модели, он создал полуколичественную модель цикла солнечной активности. Он занимался решением магнитогидродинамических уравнений и вместе с тем не мог не опираться на фактические данные наблюдений Солнца. В основе модели Лейтона тоже лежит усиление магнитного поля дифференциальным вращением. Модель эта во многом сходна с моделью Бэбкока. Но, в отличие от последней,

она учитывает связь между активными процессами на различных широтах Солнца. Кроме того, в этой модели магнитное поле никогда не является чисто полоидальным, а зона пятнообразования не только смещается к экватору, но и расширяется с ходом 11-летнего цикла. Наконец, в модели Лейтона не требуется введение магнитных силовых трубок. Поэтому она заменяет дискретную картину закона Шперера, присущую гипотезе Бэбкока, непрерывной.

Обратимся теперь непосредственно к динамо-теориям солнечных циклов, или, выражаясь более точно, теориям гидромагнитного солнечного динамо. Долгое время создание таких теорий считалось вообще неразрешимой задачей. К такому выводу привело рассмотрение простейших осесимметричных движений на Солнце, которые, как было строго доказано, не в состоянии поддерживать устойчивое магнитное поле. Но в 1955 г. Паркер сделал решительный шаг, который превратил невозможное в реально осуществимое, предложив (правда, в самой общей, эвристической форме) производить усреднение уравнений магнитной гидродинамики по составляющим среднего магнитного поля (т. е. поля, усредненного по долготе). Кроме того, он объединил этот прием с эффектом несимметричного поднимания петель, т. е. с несимметричными мелкомасштабными движениями в конвективной зоне Солнца. Как это нередко случается, сначала на идеи Паркера не обратили внимания, а затем о них вообще забыли почти на десять лет. И вспомнили об этой работе, только когда советский физик С. Н. Брагинский и астрофизики из ГДР М. Штейнбек, Ф. Краузе и К.-Х. Редлер уже не в форме прикидки, а вполне строго предложили два подхода к решению задачи гидромагнитного динамо. Первый из них, принадлежащий Брагинскому, опирается на то, что среднее магнитное поле может поддерживаться даже при слабом отклонении движений от осевой симметрии. Такой подход вполне оправдан при высокой электропроводности жидкости, характерной для подфотосферного и фотосферного слоев Солнца. Тогда если магнитное поле преимущественно тороидальное, то неосесимметричные движения действительно могут создавать эффективную электродвижущую силу, которая создает тороидальный ток, генерирующий полоидальное поле. Вспомним, что дифференциальное вращение

Солнца может превратить его полоидальное магнитное поле в тороидальное. Значит, подход Брагинского дает возможность получения замкнутого динамо-цикла: полоидальное поле превращается в тороидальное и обратно. Подход Штейнбека, Краузе и Редлера является более общим. Для той же цели, что Паркер и Брагинский, они используют турбулентную (т. е. хаотическую) конвекцию, присущую подфотосферному слою Солнца, которая отличается отсутствием зеркальной симметрии. Эта работа получила особенно широкую известность и развитие в более поздних динамо-моделях солнечных циклов, явившихся предметом обсуждения специального симпозиума Международного астрономического союза в Праге в 1975 г. «Основные механизмы солнечной активности». Все динамо-модели, начиная с построенных Бэбкоком и Лейтоном, являются кинематическими, т. е. для них безразлично, откуда взялся тот или иной тип движения и магнитного поля (все эти характеристики считаются заданными).

Итак, практически все модели гидромагнитного солнечного динамо держатся на «двух китах»: дифференциальном вращении и турбулентной конвекции. Но имеется еще одна сторона в моделях подобного рода, которая оказывается самой уязвимой. Дело в том, что создать нужное магнитное поле и внести его в солнечную атмосферу оказывается гораздо легче, чем избавиться от его излишков. Ведь обычно в космических условиях из-за громадных характерных размеров магнитное поле удерживается в лучшем случае не меньше сотни лет. Поэтому вместо обычной диффузии, привычной для классической электродинамики, приходится вводить турбулентную диффузию. Вычисление ее коэффициента базируется на теории случайных процессов, и поэтому как только речь заходит о турбулентной диффузии, так сразу же доказательство уступает свое место как бы символу веры (лучше сказать, доверия или уверенности, но это не меняет дела). Но так или иначе только этим способом динамо-модель позволяет за нужное время избавиться от избыточного магнитного поля.

Как уже, вероятно, понял читатель, исходное полоидальное магнитное поле в динамо-теориях солнечных циклов принимается сравнительно слабым, с напряженностью во всяком случае не выше сотен гаусс. Именно

поэтому движения могут диктовать этому полю в конвективной зоне Солнца свою волю. Очень важен для динамо-моделей вопрос о характере изменения угловой скорости вращения с глубиной в подфотосферной конвективной зоне, т. е. о знаке радиального градиента угловой скорости и о соотношении его с широтным градиентом этой скорости. Почти во всех современных моделях подобного рода его принимают отрицательным. Однако в некоторых из них знак этого градиента изменяется внутри конвективной зоны.

Было бы наивным и определенно излишним пытаться заинтересовать широкого читателя всем обилием решений магнитогидродинамических уравнений, которые занимают доминирующее место в работах по теории гидромагнитного динамо. Это скорее вопросы прикладной математики (поскольку чаще всего решения получены численными методами), чем физики Солнца, тем более, что все эти численные эксперименты, как называют их сами авторы динамо-моделей, интересны не столько способом их проведения, сколько их результатами. Вот на этих результатах мы и сосредоточим свое внимание. Заметим лишь, что решение уравнений, как правило, в таких исследованиях проводилось в линейном приближении. Только буквально в самые последние годы появились работы, учитывающие так называемые нелинейные эффекты, суть которых сводится к обратному воздействию магнитного поля на движения.

Как показали численные эксперименты, наиболее удовлетворительное согласие теории с наблюдениями получается, если помимо изменения угловой скорости вращения Солнца с широтой учитывать также изменение ее с глубиной, хотя и сравнительно медленное. В результате получаются две ветви динамо-волны, начинающиеся на средних широтах и смещающиеся к полюсу и к экватору. Следует иметь в виду, что радиальный градиент угловой скорости уменьшает тороидальное поле и увеличивает полоидальное. Тем самым он как бы автоматически учитывает полоидальные поля несколько более сильные и активные на полярной ветви, чем на экваториальной, в согласии с наблюдениями. Магнитная активность, возникающая на высоких широтах примерно за год до появления первых пятен нового цикла, является прямым продуктом экваториального ускорения Солнца. Радиальный же градиент угловой

скорости его вращения частично подавляет развитие полярной ветви. В то же время основные магнитные поля, возникающие на средних широтах и от них мигрирующие к экватору и полюсу, представляют собой главным образом продукт радиального градиента угловой скорости. Итак, детали подфотосферного вращения Солнца прямо отражаются на поведении поверхностных магнитных полей. Имеются веские основания считать источник солнечной активности расположенным в нижней части конвективной зоны, на глубине не меньше 200 000 км. Более того, даже эта глубина кажется маловатой для обеспечения соизмеримости с временными характеристиками 11-летнего цикла. И тут на помощь нам приходит недавно открытый диамагнитный эффект конвективной зоны, суть которого сводится к смещению магнитных силовых линий к дну этого подфотосферного слоя. Характерное время этого смещения равно примерно одному году и не зависит от напряженности поля.

Модели линейного гидромагнитного солнечного динамо объясняют только основные особенности 11-летнего и 22-летнего циклов солнечной активности: периодичность в изменении полярности магнитного поля полярных и близэкваториальных областей Солнца и смещение максимумов этого поля по широте, фазовые соотношения между полоидальной и тороидальной составляющими поля. Это не так мало. Естественно было бы ожидать от них также объяснения и более длинных солнечных циклов, а также и возможных нерегулярных долговременных изменений уровня солнечной активности. Но это под силу только нелинейным динамо-теориям. Путь к решению этой задачи лежит через изучение нелинейного обратного воздействия магнитного поля на генерирующие его движения. Хотя такие исследования находятся еще, можно сказать, в младенческом возрасте, они уже дали самое главное, что от них можно было ожидать. А именно, оказалось, что если такой механизм нелинейного обратного воздействия на систему «дифференциальное поле — крупномасштабная конвекция» действительно работает, тогда солнечное динамо должно испытывать модуляцию, связанную с солнечным циклом. Прежде всего он приводит к модуляции 80—90-летнего или 55-летнего циклов, причем сохраняется устойчивое 11-летнее колебание магнитного поля.

Кроме того, в результате этого обратного воздействия может происходить сильное ослабление крупномасштабной конвекции, которое приведет к резкому понижению уровня солнечной активности, характерному для продолжительных ее минимумов типа маундеровского. Заметим, что недавно было выдвинуто еще одно любопытное объяснение солнечных минимумов подобного рода, согласно которому их появление связано с перестройкой типа крупномасштабной конвекции от меридионального к широтному. На этом нам придется поставить точку, хотя именно в этой области сейчас следует ожидать наибольшего продвижения вперед динамо-теорий солнечной цикличности.

Вы, наверное, уже обратили внимание на то, что здесь ни единого слова не было сказано об объяснении существования активных долгот. Это невозможно сделать даже с помощью моделей нелинейного осесимметричного гидромагнитного солнечного динамо. Для этого требуются неосесимметричные решения уравнений динамо. Пока в данном направлении предприняты только первые, хотя и обнадеживающие шаги. Но здесь предстоит еще очень большая работа.

3. Теория на распутье

Прочитав предыдущий раздел этой книги, читатель мог прийти к заключению, что в настоящее время наконец-то найдена столбовая дорога к решению проблемы солнечной цикличности. Однако такой вывод был бы и преждевременным и слишком категоричным. Дело в том, что чем больше мы узнаем из наблюдений, тем труднее свести в единую систему полученные при этом сведения. Именно такова сейчас ситуация и с гипотезой гидромагнитного солнечного динамо.

Как вы помните, динамо-модели солнечных циклов обычно исходят из существования в подфотосферной конвективной зоне Солнца сравнительно слабого и диффузного среднего магнитного поля. Это неплохо согласуется с картиной, даваемой солнечным магнитографом, который вырезает площадки солнечной фотосферы достаточно большого размера, т. е. с картиной усредненного (или крупномасштабного) магнитного поля. Однако чем дальше, тем больше исследователи Солнца, особенно наблюдатели, укрепляются в мнении, что на

самом деле солнечное магнитное поле состоит из отдельных силовых трубок с поперечным сечением порядка 100 км и имеет в них напряженность 1000—2000 Гс, что по крайней мере в 10—100 раз выше, чем получается из магнитографических измерений. А если это так, то сразу же возникает вопрос, насколько данный факт важен для теории. Пока нет определенного ответа на вопрос создателей динамо-теорий солнечных циклов, какому из приведенных здесь значению магнитной напряженности (1000 или 2000 Гс) следует отдать предпочтение, рано подвергать модели солнечного динамо сомнению и тем более отвергать их. Но уместно сказать в связи с этим, что сейчас теория солнечных циклов находится на распутье. Если магнитная напряженность в силовых трубках окажется равной 2000 Гс, сторонники динамо-теорий солнечных циклов попадут в крайне затруднительное положение.

Если подходить с этой точки зрения к ныне разработанным гипотезам о происхождении солнечной цикличности, то самой незыблемой из них, как и прежде, оказывается модель Бэбкока. Между прочим, критики динамо-теории считают, что она была «притянута за уши» в число моделей этого рода и в равной степени могла бы свидетельствовать и против них. Во всяком случае, главный упрек, который выдвигается в отношении этой гипотезы, относится к смене знака магнитного поля в полярных областях Солнца. Интересно, что по этому вопросу Бэбкока критикуют и как наблюдателя и как теоретика. С одной стороны, если учесть трудность в определении направления элементов магнитного поля вблизи полюсов, может оказаться ошибочным вывод об обращении знака этого усредненного полоидального поля. Более того, по мнению австралийского астрофизика Дж. Пиддингтона, вряд ли можно считать это поле полоидальным. Скорее оно представляет собой часть тороидального поля, вынесенную в полярные области. С другой стороны, если бы смена полярности полоидального поля происходила так, как это описано в модели Бэбкока (а также в динамо-моделях), то через два—три 11-летних цикла Солнце полностью потеряло бы свое магнитное поле. Первый из упреков можно скорее считать простым опасением, но второй не так уж безоснователен.

Самым же уязвимым местом динамо-теорий солнечных циклов является лежащая в их основе турбулентная диффузия. Как уже отмечалось, она привлечена для того, чтобы избавиться от излишнего магнитного поля после его усиления. Противники этой точки зрения, в особенности Пиддингтон, доказывают, что такой роли турбулентная диффузия не сыграет и что, наоборот, она приведет к еще большему усилению поля. Пытаясь уйти от этих возражений, Паркер предложил ввести в динамо-теорию существенное изменение. Он полагает, что вместо быстрого слияния магнитных петель, образованных в результате турбулентной конвекции, поле вытягивается в длинные тонкие волокна, которые могут сливаться с соседними противоположно направленными волокнами и затем исчезают. В результате действия такого механизма быстрого роста поля не происходит. И тем не менее, даже при такой модификации динамо-теории солнечных циклов, возражения Пиддингтона имеют основания, как утверждает сам Паркер.

Что же может быть противопоставлено гипотезе гидромагнитного солнечного динамо в настоящее время? Мы уже видели, что гипотеза Бэбкока только в какой-то мере могла бы служить для этой цели. Кроме нее, пока имеется только одна альтернатива. Это гипотеза изначального первичного магнитного поля, которую сторонники динамо-моделей называют «пиддингтоновской ересью». Главной заслугой Пиддингтона до настоящего времени была прежде всего критика динамо-теорий солнечных циклов, которая стимулировала еще более активную дальнейшую их разработку. В то же время, именно в его гипотезе были сведены в единую систему данные наблюдений солнечной активности, в том числе и о ее тонкой структуре. Такая систематизация проведена впервые со времени появления гипотезы Бэбкока. Следует сразу же сказать, что пока гипотеза Пиддингтона находится в стадии становления и во многих отношениях еще более уязвима, чем модели гидромагнитного солнечного динамо. Гипотеза Пиддингтона завоевала симпатию наблюдателей Солнца, особенно тех из них, которые занимаются исследованием тонкой структуры солнечной атмосферы, но теоретики отнеслись к ней с большим недоверием, тем более,

что в настоящее время она является чисто феноменологической.

Таким образом, вряд ли имеет смысл детально излагать здесь гипотезу изначального первичного магнитного поля Солнца. Однако мы обрисуем самые общие ее контуры, поскольку они позволяют понять, насколько можно доверять ныне существующей альтернативе динамо-теориям солнечных циклов. Исходный пункт гипотезы Пиддингтона состоит в том, что в недрах Солнца, во всяком случае ниже подфотосферной конвективной зоны, существует изначальное первичное магнитное поле, которое имеет форму диполя и не проявляется непосредственно в солнечной атмосфере. Это поле постоянно и не меняет своего знака. Как и в гипотезе Бэбкока, дифференциальное вращение Солнца вытягивает и закручивает это полоидальное поле, образуя более сильное тороидальное поле. Именно такое сильное закрученное тороидальное поле в форме магнитных жгутов и выносится в солнечную атмосферу. Таким образом, в атмосфере Солнца мы имеем дело только с тороидальным полем. Обращение знака этого поля при переходе от одного 11-летнего цикла к другому происходит благодаря меридиональным колебаниям изначального первичного поля. Активная область образуется, когда часть магнитного жгута всплывает и постепенно расширяется при дальнейшем его всплытии. При этом формируется система арочных волокон и затем солнечные пятна. Здесь мы имеем дело с важным моментом гипотезы Пиддингтона, который состоит в том, что выходя в солнечную атмосферу магнитный жгут не закручивается, а раскручивается, точнее, распрямляется. Тороидальное поле в подфотосферном слое представляет собой как бы дерево, стволом которого является основной магнитный жгут, а верхние его ветки дают слабые крупномасштабные магнитные поля, в частности, униполярные магнитные области. Отрывом от магнитных жгутов объясняется смещение хвостовых частей магнитных областей к востоку и к полюсу. Отрыв части жгута от Солнца и возмущение им соседних жгутов могут обусловить существование активных долгот.

Наиболее уязвимо в гипотезе Пиддингтона представление о распрямлении магнитных жгутов при их выходе в солнечную фотосферу. Согласно современным физическим теориям, при выталкивании магнитного

жгута (в форме спирали) из конвективной зоны Солнца его вершина должна быть местом максимального закручивания, а не наибольшего раскручивания, или распрямления, как предполагается в этой гипотезе. Непонятно, каким образом такой закрученный жгут расщепляется, в результате чего в его вершине образуются многие отдельные детали активной области. Нет смысла приводить здесь более частные критические замечания в адрес этой модели. Даже из сказанного становится ясным, что гипотеза изначального первичного магнитного поля Солнца требует серьезного теоретического обоснования в самой своей основе.

Итак, мы оставляем читателя на распутье. Как сложится судьба динамо-моделей солнечных циклов и альтернативной им модели, покажет будущее. А покаждемся от наблюдателей Солнца ответа на вопрос, какова же истинная величина напряженности первичных элементов солнечного магнитного поля.

Глава 7

СЛУЖБА СОЛНЦА

1. Международная и советская службы Солнца

Ранее мы уже говорили о том, что понимание природы солнечной активности зависит прежде всего от накопления как можно более полного однородного материала о всех изменениях, которые происходят в атмосфере Солнца. Решение этой задачи не под силу одной обсерватории даже в отношении таких медленно меняющихся образований, как группы солнечных пятен или факельные площадки. Действительно, ведь при самом удачном (в смысле климатических условий) расположении обсерватории нельзя ожидать, что каждый день над ней будет безоблачное небо. А если говорить о кратковременных явлениях, например, о солнечных вспышках, то при ясной погоде никаким чудом нельзя в одном месте наблюдать Солнце 24 часа в сутки. Значит, нужно объединение усилий многих обсерваторий, а для некоторых задач — даже обсерваторий многих стран.

Но не всякие наблюдения пригодны для получения однородных данных. Для этой цели необходимо наблюдать на одинаковых или хотя бы однотипных инструментах, применять при этом одинаковые методы наблю-

дений и обработки полученного материала. Именно такие цели и преследует организация службы Солнца. Она призвана обеспечить регулярные наблюдения всех слоев солнечной атмосферы по стандартным программам.

Первоначально наблюдения по программам службы Солнца носили довольно примитивный и ограниченный характер. Первая такая служба была организована более ста лет назад в Цюрихе Р. Вольфом для определения относительных чисел солнечных пятен. Как мы уже видели, она принесла большую пользу в изучении солнечных циклов. За последние сорок лет цюрихская служба Солнца прославилась также своими определениями классов групп пятен. Затем эта служба охватила десятки обсерваторий Европы, Азии и Америки. С 1981 г. Цюрихская обсерватория прекратила свою работу как участница и глава международной службы определения чисел Вольфа и передала свои функции Королевской обсерватории Бельгии (Брюссель), которая в течение многих лет участвовала в этой программе и обладает однотипными с ней инструментами.

Не менее известна гринвичская служба Солнца. Она впервые организовала фотографические наблюдения солнечной фотосферы. Усилиями обсерваторий в Гринвиче (Англия), Кодайканале (Индия) и Кейптауне (Южная Африка) были получены первоклассные определения площадей пятен, которые охватывают почти столетний период. С 1977 г. Гринвичская обсерватория прекратила эту работу. Восприимницей ее стала Дебреценская гелиофизическая обсерватория (Венгрия).

К числу долго действующих служб Солнца можно отнести Медонскую (Франция) и Маунт Вилсоновскую (США). Первая из них прославилась своими картами хромосферы, каталогами активных областей и водородных волокон; она возглавляла международную службу солнечных вспышек. На второй впервые были организованы измерения магнитных полей солнечных пятен.

Советская служба Солнца сравнительно молода. Она была организована в 1932 г. Комиссией по исследованию Солнца Астрономического совета АН СССР и первоначально ограничивались наблюдениями солнечной фотосферы. В послевоенные годы круг ее наблюдений значительно расширился и охватывает ныне все слои атмосферы Солнца.

В течение длительного времени существовал значительный разрыв между наблюдениями службы Солнца и эпизодическими наблюдениями Солнца высокой точности. Первые проводились с помощью довольно примитивных средств, главным образом астрономами-любителями или, в лучшем случае, профессионалами средней квалификации. Вторые выполнялись на новейших астрономических инструментах, причем делали это наиболее квалифицированные астрономы. Только после того, как все убедились в необходимости регулярных наблюдений явлений солнечной активности, эта резкая граница стала постепенно стираться.

Нынешняя служба Солнца широко использует все новейшие достижения астрономического приборостроения. Фотография, кино и радиотехника заняли прочное место среди ее средств наблюдения. Производятся, хотя и эпизодически, наблюдения с космических аппаратов. И только в некоторых случаях, исключительно ради сохранения системы, продолжают пользоваться глазомерными оценками.

Мы не станем здесь описывать все инструменты и приборы, которые используются в настоящее время в службе Солнца, тем более, что о них рассказывается во многих популярных изданиях, в частности, в популярной книге известного советского астрофизика А. Б. Северного «Физика Солнца». Но для общего представления необходимо хотя бы перечислить их и дать самое общее представление о принципах их работы. Естественно, что при этом мы будем ориентироваться на соответствующее оборудование советской службы Солнца.

Наиболее широко используется нашими солнечными обсерваториями фотосферно-хромосферный телескоп (рис. 19). Как видно уже из самого названия этого инструмента, он позволяет проводить наблюдения фотосферы и хромосферы Солнца. Для этого в нем имеется две трубы. Первая из них используется для фотографирования в обычном белом свете изображения Солнца, т. е. его фотосферы. Вторая содержит специальный фильтр, который дает возможность получать на фотопленке снимки хромосферы в свете красной водородной линии H_{α} . Кроме фотоаппарата, на эту трубу можно насадить специальную киноприставку для регистрации солнечных вспышек.

К сожалению, пока нет специальных фильтров для фиолетовой линии ионизованного кальция. Поэтому для фотографирования хромосферы Солнца в лучах этой линии вместо фотосферно-хромосферного телескопа используют другой инструмент — спектрогелиограф. В отличие от обычного спектрографа, в нем имеется также

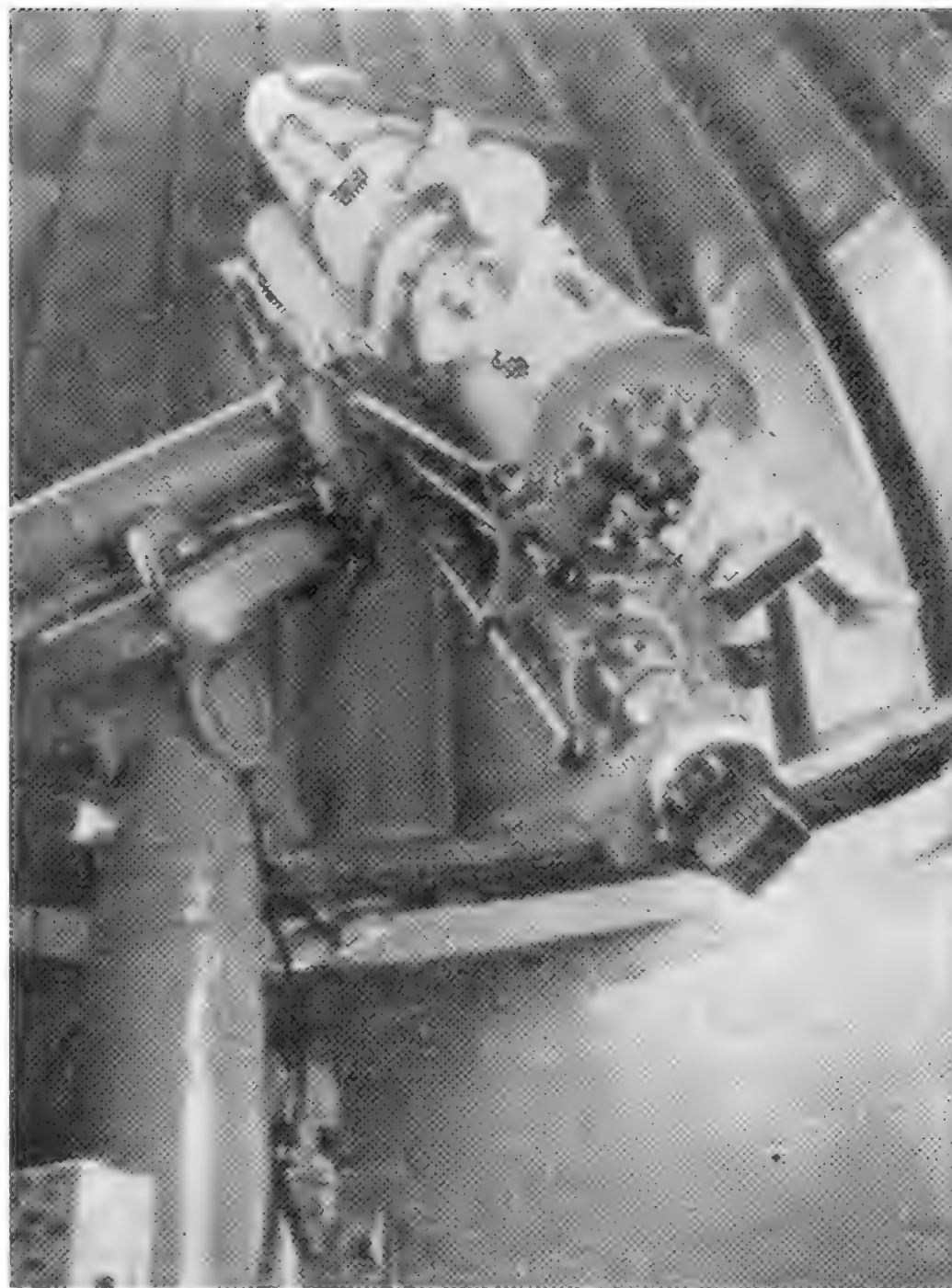


Рис. 19. Фотосферно-хромосферный телескоп, установленный на Горной астрономической станции ГАО АН СССР.

вторая щель, «вырезающая» ту линию спектра Солнца, в которой собираются фотографировать наше дневное светило. С помощью специального устройства солнечный диск «протягивается» по этой щели, и на пластинке получается изображение Солнца, например, в свете фиолетовой линии ионизованного кальция. К сожалению, очень трудно обеспечить идеально равномерное «протягивание» диска Солнца по щели, и поэтому изображение

Солнца получается «полосатым», что затрудняет выделение кальциевых флоккулов, особенно малой яркости.

Особое устройство требуется для измерения магнитных полей солнечных пятен. Для этой цели используются специальные насадки к спектрографам горизонтальных или башенных солнечных телескопов. С помощью различных приспособлений в них производится расщепление спектральной линии железа, подверженной

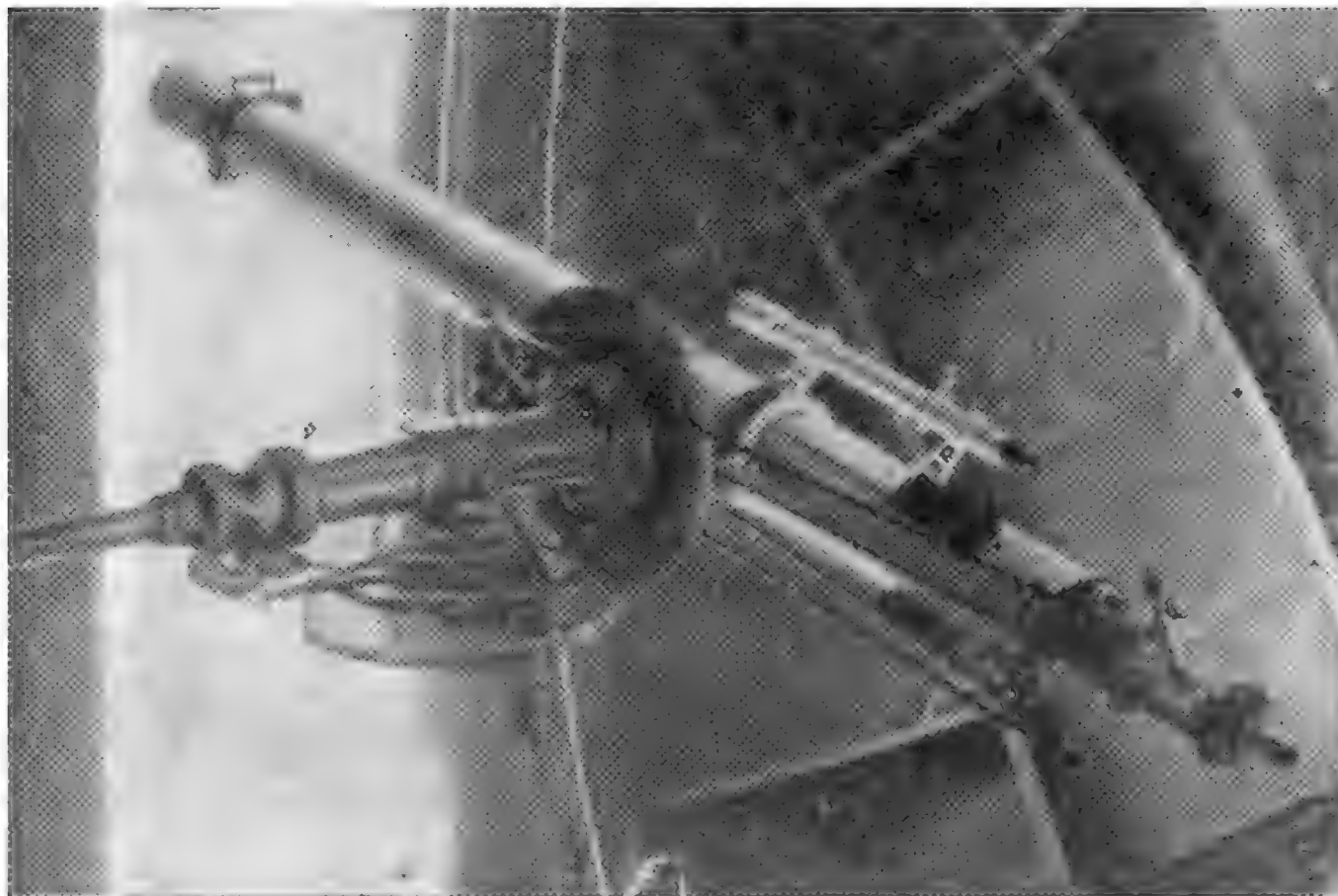


Рис. 20. Вnezатменный коронограф системы Б. Лио, установленный на Горной астрономической станции ГАО АН СССР.

влиянию магнитного поля, на две составляющие. По расстоянию между этими составляющими и судят о величине напряженности магнитного поля пятна, а по их относительным интенсивностям — о его знаке. Измерения эти производятся в основном визуально, т. е. на глаз, но иногда и фотографически.

Для наиболее сложных наблюдений солнечной короны используются вnezатменные коронографы системы французского астронома Б. Лио (рис. 20). Внутри этого инструмента с помощью специальной системы создается искусственное затмение Солнца, что позволяет получать снимки корональных линий или корональных структур в свете этих линий. В первом случае нужен обычный спектрограф, а во втором — специальный фильтр для корональной (обычно зеленой) линии. Де-

тальное описание этого замечательного инструмента можно найти в брошюре М. Н. Гневыхева «Кисловодская горная астрономическая станция».

Наконец, для наблюдений радиоизлучения Солнца используются в основном малые радиотелескопы с тарелкообразными антеннами диаметром 2—3 м и приемными устройствами для различных длин волн. Для выделения локальных источников радиоизлучения в сантиметровом диапазоне длин волн применяют Большой

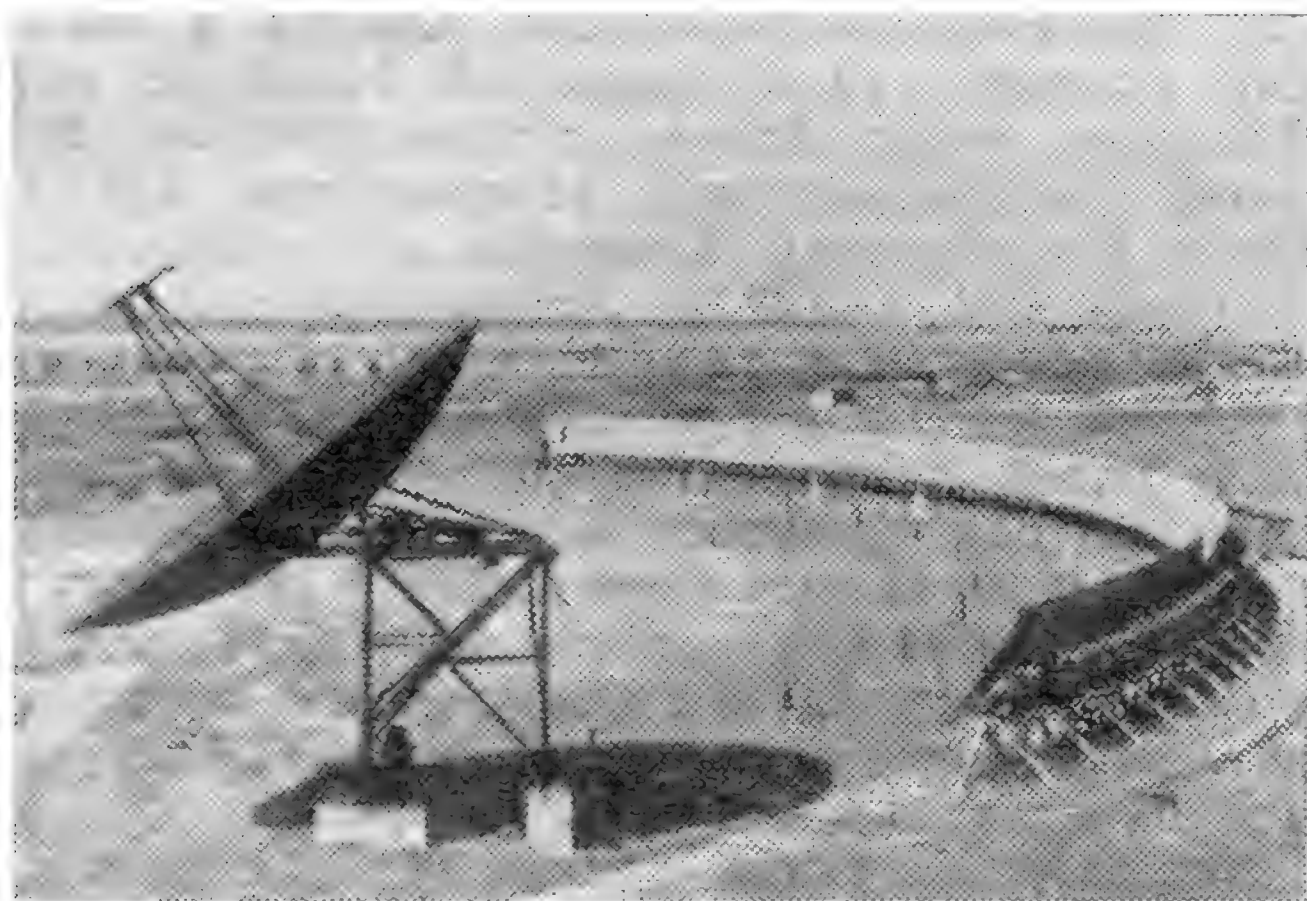


Рис. 21. Большой пулковский радиотелескоп.

пулковский радиотелескоп, антенну переменного профиля с максимальной длиной дуги 130 м (рис. 21). В последнее время стали входить в практику специальные радиоспектрографы, пока для метровых длин волн, которые позволяют изучать спектры всплесков радиоизлучения Солнца.

Перечисленные здесь инструменты и приборы позволяют получить достаточно полные с точки зрения службы Солнца сведения о всех явлениях солнечной активности как в оптическом, так и в радиодиапазоне. Эти данные имеют двойной характер. С одной стороны, это различные индексы солнечной активности, о которых мы уже говорили ранее. С другой стороны,— это пространственная характеристика и показатели мощности отдельных активных образований. Первые нужны преж-

де всего для изучения особенностей солнечной цикличности и, следовательно, для прогнозов активности Солнца. Вторые требуются для оперативного использования геофизикам, радиофизикам и биологам. В особенности их интересуют данные о солнечных вспышках во всех их проявлениях. Наконец, в последние десятилетия выяснилось, что материалы службы Солнца могут широко использоваться для исследования самых разных вопросов физики Солнца, в особенности, когда речь идет о динамике, т. е. развитии того или иного процесса.

В работе советской службы Солнца в настоящее время участвует 16 обсерваторий. Наиболее широкие наблюдения ведут Горная астрономическая станция Главной астрономической обсерватории АН СССР (вблизи Кисловодска), Крымская астрофизическая обсерватория АН СССР и Астрономический институт АН Узбекской ССР (в Ташкенте). Горная станция возглавляет работу по регулярным наблюдениям солнечных пятен, факельных площадок, протуберанцев и короны Солнца. Крымская обсерватория руководит наблюдениями магнитных полей пятен и солнечных вспышек. Астрономический институт АН Узбекской ССР является главной станцией по наблюдению волокон и так называемых быстрых процессов, т. е. бурных изменений протуберанцев и волокон.

Хотя Горная станция — самая молодая из этих трех обсерваторий, она по праву славится точностью и скрупулезностью своих наблюдений. В частности, ее корональные наблюдения признаны самыми точными в мире. Поэтому не удивительно, что в настоящее время Горная станция возглавляет международную службу солнечной короны. Она славится также исключительно большим числом дней наблюдений за год, что связано как с благоприятными условиями погоды, так и с большими усилиями ее сотрудников. На Горной станции наблюдают пятна и фотосферные факелы, флоккулы, протуберанцы и волокна, измеряют магнитные поля пятен и радиоизлучение Солнца на сантиметровых волнах.

Крымская обсерватория еще в 50-е годы выдвинулась своими исследованиями физики Солнца. Сначала это были почти исключительно работы, базирующиеся на отдельных наблюдениях очень высокой точности. Однако уже через несколько лет крымские астрономы возглавили службу магнитных полей солнечных пятен

в СССР. В настоящее время в Крыму измеряют магнитные поля пятен и радиоизлучение Солнца на сантиметровых длинах волн.

Астрономический институт АН Узбекской ССР (ранее Ташкентская астрономическая обсерватория) является, пожалуй, старейшей станцией советской службы Солнца. Еще в 30-е годы в Ташкенте велись регулярные наблюдения не только пятен, но и солнечных вспышек, и уже тогда Ташкентская обсерватория участвовала в международной службе Солнца. Только Симеизская обсерватория, в те годы являвшаяся отделением Пулковской, может тоже претендовать на то, что она стояла у истоков советской службы Солнца. Но это скорее история. А в Ташкенте после получения новых солнечных инструментов, кроме тех активных образований, о которых мы уже говорили, сейчас наблюдают также водородные волокна и быстрые процессы.

Если еще в начале 50-х годов преобладающая часть станций службы Солнца СССР располагалась в европейской части нашей страны, то теперь они раскинулись от Львова до Уссурийска. Примерно треть этих обсерваторий находится в Средней Азии, на Урале, в Сибири и на Дальнем Востоке.

Ныне с нами успешно кооперируют свою работу обсерватории многих социалистических стран: Венгрии, Германской Демократической Республики, Кубы, Монголии, Польши, Румынии, Чехословакии. Это значительно расширяет возможности наблюдений солнечных вспышек и всплесков радиоизлучения в более поздние часы суток, а также позволяет значительно увеличить число дней с наблюдениями короны и измерениями магнитных полей пятен.

Все материалы, получаемые службой Солнца СССР, срочно направляются заинтересованным организациям. А сообщения о сильных солнечных вспышках передаются даже телеграфом или телетайпом в центр этих данных в Москве. Кроме того, предварительные материалы наблюдений службы Солнца ежемесячно публикуются в бюллетене «Солнечные данные» в виде карт и таблиц. Несколько позже сводные данные многих обсерваторий, приведенные в одну систему, печатаются в пулковских «Каталогах солнечной деятельности».

Уже на примере советской службы Солнца можно убедиться в том, что она требует больших усилий от

всех ее участников. Но эти усилия вполне оправданы, поскольку они дают неоценимый материал, без которого даже самые совершенные одиночные или кратковременные наблюдения не могут быть понятны в достаточной степени. А если говорить о конечной цели — создании единой теории солнечной активности, — то это еще более очевидно.

Нынешняя служба Солнца, как советская, так и международная, использует в основном наземные наблюдения. Поэтому сейчас еще нет регулярной регистрации коротковолновых излучений Солнца, в частности, рентгеновского, и солнечных частиц различной энергии. Те обрывочные сведения, которые получены за двадцать с лишним лет с помощью космических ракет и различных космических аппаратов, хотя и представляют большой интерес, скорее можно назвать разведкой боем, чем настоящим наблюдением. Несомненно, придет время, когда регулярные наблюдения подобного рода станут столь же обыденными, как нынешние наземные наблюдения службы Солнца.

2. Международные предприятия по изучению солнечной активности (МГГ, МГС, МГСС, ГСМ)

Читатель, надеюсь, уже получил представление о целях и современном состоянии службы Солнца, данные которой служат фундаментом всех наших представлений о солнечной активности. Несмотря на то, что она требует больших усилий и напряжения всех ее участников, возможности ее во многих отношениях очень ограничены. Это связано и с необходимостью использования достаточно простой стандартной аппаратуры и единой методики наблюдений и их обработки, а также и с определенной частотой таких наблюдений. Вот почему время от времени возникает необходимость сосредоточить усилия исследователей Солнца всего мира на решении какой-то более частной, но ключевой задачи, используя для этого самые мощные средства наблюдения. Естественно, что в изучении солнечной активности несколько не меньше заинтересованы и геофизики. Поэтому чаще всего усилия исследователей Солнца и геофизиков оказываются совместными. Если в период двух первых международных предприятий подобного рода — первого и второго международных полярных годов —

проводились в основном геофизические исследования, то в дальнейшем все больше и больше стали делать упор на исследование нашего дневного светила.

Международный геофизический год (МГГ, с июля 1957 по декабрь 1958 г.) и сразу же за ним последовавший Год международного геофизического сотрудничества (МГС, 1959 г.) имели своей главной целью изучение явлений солнечной активности, в особенности солнечных вспышек и всплесков радиоизлучения Солнца и связанных с ними основных геофизических характеристик. Наблюдения старались проводить в возможно большем количестве пунктов земного шара, в частности, в Антарктиде и в Мировом океане, в эпоху максимума 11-летнего цикла. То было время самого высокого в истории наблюдений Солнца максимума солнечной активности. В этом смысле организаторам МГГ—МГС исключительно повезло. Но совместные усилия ученых принесли бы гораздо более скромные результаты, если бы в самом начале МГГ не удалось осуществить первый прорыв в Космос. 4 октября 1957 г. первый советский искусственный спутник Земли положил начало внеатмосферным исследованиям Космоса, в которых важное место занимает изучение солнечной активности и ее проявлений в межпланетной среде.

Если попытаться здесь изложить хотя бы основные результаты только в области физики Солнца, которые были получены за период МГГ—МГС, для этого потребовалась бы еще одна такая книга. Поэтому ограничимся только самым главным и лишь в самых общих чертах, тем более, что об этом уже в какой-то мере упоминалось в предыдущих главах. Начнем с того, что Солнце оказалось источником космических лучей. Если раньше знали только, что высокая солнечная активность ведет к ослаблению галактических космических лучей, то новый факт оказался для многих неожиданным. Именно со времени МГГ и ведут свою родословную солнечные протонные вспышки, которые хотя и несут космические лучи сравнительно скромных энергий, тем не менее могут представлять опасность для полетов пилотируемых космических кораблей, не говоря уже о возмущениях, которые они вызывают в земной атмосфере. Теперь мы хорошо знаем, что появление солнечных вспышек в значительной степени определяется строением магнитного поля в активных областях, где они воз-

никают, и его изменением. Но именно в период МГГ—МГС были получены веские доводы в пользу этой точки зрения. Тогда же измерения с помощью солнечного магнитографа Бэбкока впервые продемонстрировали изменение знака магнитного поля Солнца в полярных областях. Наконец, космические аппараты не только окончательно подтвердили существование солнечного ветра, но и позволили измерить основные его характеристики: скорость, плотность и магнитное поле. Хотя это и не относится к физике Солнца, невозможно удержаться от соблазна напомнить читателю, что именно тогда были открыты и радиационные пояса Земли.

Но этим далеко не исчерпывается значение МГГ—МГС. Помимо создания совершенно новой аппаратуры для исследования Солнца из Космоса, важность которой трудно переоценить, этот период послужил мощным толчком для развития международной и советской служб Солнца. Именно ко второй половине 1957 г. многие астрономические обсерватории нашей страны, занимающиеся изучением Солнца, были оснащены наиболее совершенным новым оборудованием, которое и поныне продолжает работать. Более того, в это же время была окончательно разработана методика регулярных наблюдений солнечных вспышек и магнитных полей солнечных пятен. Решающую роль в этом сыграла Крымская астрофизическая обсерватория АН СССР. Наконец, период МГГ—МГС результатами своих геофизических исследований заложил основу для превращения проблемы солнечно-земных связей в солнечно-земную физику и тем самым еще более способствовал проведению совместных исследований гелиофизиков и геофизиков.

В результате всего через четыре года (1964—1965 гг.) после окончания МГС было организовано новое крупное международное предприятие — Международный год спокойного Солнца (МГСС). И в этом случае выбор периода его проведения, связанный с прогнозом эпохи минимума 19-го цикла солнечной активности, оказался очень удачным: минимум чисел Вольфа был в середине 1964 г., а в 1965 г. роста активности почти не ощущалось. В отличие от МГГ—МГС, основная задача МГСС состояла в детальном изучении развития медленно меняющихся активных образований, в особенности групп солнечных пятен и слабых крупномасштабных фо-

тосферных магнитных полей, а также межпланетного магнитного поля и других особенностей солнечного ветра и связанных с ними геофизических процессов.

Пожалуй, самые интересные результаты МГСС относятся к изучению активных областей и активных долгот. Низкий уровень солнечной активности был особенно благоприятен для четкого выделения активных областей от их появления до полного разрушения. Это позволило детально проследить их развитие не только на «флоккульной», но и на последней стадии их эволюции. Именно в период МГСС были получены все основные сведения о крупномасштабных биполярных и униполярных магнитных областях и их долготном распределении. Тогда же были устранены последние сомнения в реальности активных долгот на Солнце. Наконец, к этому времени относится и открытие секторной структуры межпланетного магнитного поля и установление ее связи с крупномасштабным фотосферным магнитным полем.

Затем последовала длительная пауза. Правда, в это время тоже выполнялись отдельные кооперативные программы наблюдений Солнца, но более частного характера, например, по изучению эволюции активных областей, исследованию быстрых изменений солнечных магнитных полей, изучению проблемы возникновения солнечных вспышек. Однако все они не только не носили такого глобального характера, как предшествовавшие им международные предприятия, но даже нередко, несмотря на одновременность их выполнения, перекрывали друг друга. И вот, наконец, с осени 1979 г. начался Год солнечного максимума (ГСМ), который сначала намечали завершить в конце 1980 г., а затем с общего согласия его участников продлили до лета 1981 г. На первый взгляд может показаться, что цель его сравнительно узка. Она состоит в том, чтобы понять, как создаются солнечные вспышки и к чему они приводят в межпланетном (в частности, околоземном) пространстве. Но, в сущности, решение этой проблемы является ключом к объяснению всех нестационарных, быстротечных процессов в солнечной атмосфере.

Впервые всеобщее внимание ученых к солнечным вспышкам было приковано в период МГГ — МГС. Однако это была лишь разведка. Она показала, что проводя исследования только в видимой области спектра, никоим образом нельзя выявить сущность вспышек.

В дальнейшем для решения этой задачи использовались специальные космические аппараты. Много ценных сведений о солнечных вспышках дала американская орбитальная станция «Скайлэб», запущенная в 1973 г. Но ее данные не были достаточно обеспечены наземными наблюдениями Солнца. Поэтому во многих случаях их объяснение оказалось затруднительным. Это был поучительный урок для исследователей Солнца, который и послужил толчком к организации такого крупного международного предприятия, каким является ГСМ.

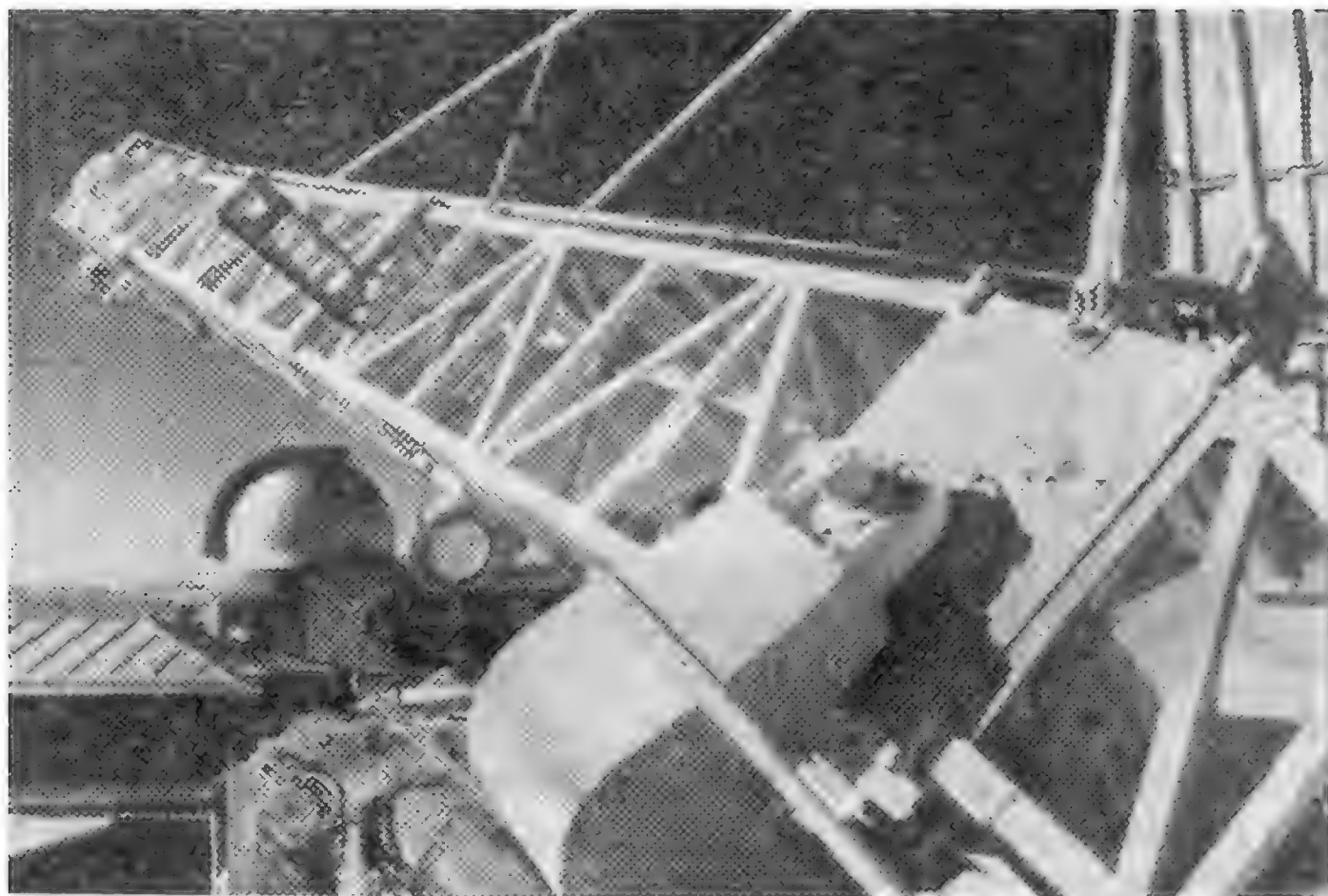


Рис. 22. Большой внеатомный коронсграф, установленный на Горной астрономической станции ГАО АН СССР.

Самая важная отличительная черта ГСМ состоит, вероятно, в том, что на штурм солнечных вспышек были брошены самые мощные средства наблюдений Солнца с поверхности Земли и из Космоса, какие только имеются в той или иной стране — участнице этого предприятия. Например, в нашей стране такими инструментами являются крупнейший радиотелескоп РАТАН-600 и самые большие в мире 53-сантиметровые внеатомные коронографы (рис. 22), установленные на Кавказе, в Средней Азии и Сибири. Важная роль отводится американскому космическому аппарату «Задача солнечного максимума», который был запущен на околоземную орбиту в феврале 1980 г. На его борту размещены шесть ин-

струментов для наблюдения солнечных вспышек в дальней ультрафиолетовой области спектра и в рентгеновских и гамма-лучах, а также радиометр для измерения колебаний солнечной постоянной с исключительно высокой точностью (до 0,1%). Характерной особенностью этой аппаратуры служит ее взаимосогласованность, которая делает возможным проведение одновременных наблюдений в различных спектральных диапазонах. Но главный упор в период ГСМ делался на полной согласованности программ космических и наземных экспериментов, без которой невозможно получить полную картину солнечных вспышек. Поэтому большое значение придавалось наземным наблюдениям вспышек и связанных с ними (или сопутствующим им) активных образований в установленные интервалы времени на более скромных солнечных инструментах.

Сейчас было бы преждевременно говорить о научных результатах ГСМ. Но даже предварительные данные, которые опубликованы к настоящему времени, показывают, что петельные структуры действительно являются характерными для солнечных вспышек и что всплывание нового магнитного потока играет важную роль в их появлении. Они также свидетельствуют о том, что гамма-излучение не столь уж редко присуще вспышкам. Во всяком случае, оно отмечалось у ряда вспышек, наблюдавшихся космическим аппаратом в период ГСМ. Более того, из этих данных следует, что картина солнечных вспышек отнюдь не столь проста и однотипна, даже когда речь идет о вспышках примерно одинаковой мощности. Пока материалы ГСМ находятся в стадии обработки и осмысления. Все мы с большим интересом ждем их публикации, которая, безусловно, прольет новый свет на это самое мощное и самое загадочное явление солнечной активности.

Итак, международные предприятия служат важным подспорьем постоянно действующей службе Солнца в изучении солнечной активности. Решая ряд ее ключевых проблем, они вместе с тем способствуют совершенствованию ее инструментальной базы.

3. Прогнозы солнечной активности

Самой лучшей наградой за проникновение в сущность изучаемого явления природы служит умение предсказать его. Но такое случается крайне редко. Сложность

явлений природы чаще всего не позволяет нам добраться до их сути, хотя порой нам и кажется, что мы уже «схватили» ее. Достаточно вспомнить хотя бы о прогнозах погоды, чтобы убедиться в этом. Ведь численные их методы покоятся на прочной теоретической основе. И тем не менее имеются какие-то порой даже неуловимые «подводные камни», которые мешают достижению ожидаемого успеха.

Но когда речь идет о предсказании солнечной активности, ситуация оказывается гораздо сложнее. Мы уже убедились в том, что единой полной ее теории пока не создано. Определяемые ныне индексы солнечной активности, в отличие от используемых в метеорологии, чаще всего не имеют определенного физического смысла. Однородность и непрерывность их рядов также оставляет желать много лучшего. Кроме того, эти характеристики испытывают циклические и случайные колебания, которые ведут к непостоянству их средних величин за большие интервалы времени. И тем не менее прогнозы в этой области очень нужны людям для таких чисто практических целей, как, например, предсказание условий радиосвязи. С этим нельзя не считаться. Вот почему исследователи Солнца уже несколько десятков лет заняты разработкой методов прогнозов солнечной активности. Пока эти методы, как правило, являются чисто эмпирико-статистическими, т. е. опираются исключительно на всевозможные статистические связи между различными характеристиками солнечной активности, многие из которых были описаны в главе 4 этой книги.

В понятие прогнозов солнечной активности чаще всего вкладывают два смысла: 1) предвычисление различных солнечных индексов, 2) предсказание возникновения отдельных активных образований. Если первый имеет дело со средними характеристиками за тот или иной интервал времени, то второй — с индивидуальными явлениями. Естественно поэтому, что методы прогноза этих двух типов должны быть принципиально различными. Если первый использует исключительно статистические закономерности, то второй сочетает их со знанием синоптической картины на Солнце. Не случайно поэтому второй тип прогнозов стал развиваться только за последние 15—20 лет, особенно в связи с запусками космических кораблей.

Все прогнозы солнечной активности обычно подразделяют на три класса: 1) краткосрочные, 2) долгосрочные, 3) сверхдолгосрочные. Следует сразу же обратить внимание на то, что краткосрочные прогнозы индексов солнечной активности, как и отдельных ее явлений, нуждаются в знании синоптической картины и в настоящее время находятся еще в младенческом состоянии, ограничиваясь качественными оценками. Долгосрочные прогнозы имеют дело с индексами, усредненными за месяц, квартал и год. Как видим, усреднение связано с чисто земными интервалами времени, что, безусловно, вызвано практической направленностью таких прогнозов. Поскольку усреднения даже за три месяца, не говоря уже об одном месяце, соизмеримы с длительностью флуктуаций солнечной активности, их выделяют в особый подкласс прогнозов средней срочности. Такие прогнозы особенно затруднительны и в этом смысле не идут ни в какое сравнение с предвычислением среднегодовых величин солнечных индексов. Что же касается сверхдолгосрочных прогнозов солнечной активности, т. е. прогнозов на следующий 11-летний цикл или даже на следующие циклы, то, несмотря на их почти столетнюю историю, они пока принесли успехов гораздо меньше, чем огорчений.

Начнем с самых древних сверхдолгосрочных прогнозов. Долгое время они напоминали нечто вроде математических упражнений с набором солнечных циклов различной длительности. Раньше вы уже могли убедиться, насколько трудно получить определенные суждения о длинных циклах, начиная с 80—90-летнего. И это не удивительно. Что можно сказать о них, располагая единственным сравнительно длинным рядом относительных чисел солнечных пятен, который не охватывает и трех столетий? Естественно, что из него можно было извлечь только такие варианты 11-летнего цикла, которые уже встречались в этом ряду. Но пока уровень солнечной активности в общем продолжает расти, трудно представить себе, чтобы спад нынешнего векового цикла был таким же, как в начале нынешнего и предыдущего столетий. Так оно и оказалось. Наиболее неправдоподобными оказались прогнозы 21-го цикла солнечной активности, которые опирались на существование двойного 80—90-летнего цикла. Несколько лучше обстояло дело с предвычислением, опиравшимся на особенности 11-летних

циклов, составляющих 22-летний (правило Гневывшева — Оля). Они дали неплохие качественные результаты, хотя и оказались несколько заниженными для 21-го цикла. Во всяком случае после длительных поисков исследователи Солнца пришли к твердому убеждению, что всерьез можно относиться только к прогнозам на следующий 11-летний цикл, которые даны за один-два года до его начала. Прогнозы же, сделанные за более длительные сроки, лишены какого бы то ни было физического основания и поэтому чаще всего обречены на провал. Самое большее, на что можно надеяться в таких случаях, это на чисто качественные оценки, связанные с определенной фазой длинных циклов солнечной активности.

Самый эффективный из методов сверхдолгосрочных прогнозов солнечной активности был предложен советским геофизиком и исследователем Солнца А. И. Олем. Этот метод получил всемирное признание на международном совещании по солнечно-земным прогнозам в Боулдере (США) в 1979 г. Суть метода Оля состоит в следующем. Как мы уже знаем (см. главу 4, раздел 2), существует тесная связь между индексами рекуррентной геомагнитной активности за последние четыре года текущего 11-летнего цикла с максимальным числом Вольфа в следующем цикле. Именно основываясь на этой закономерности Оль получил вполне удовлетворительный прогноз высоты 20-го и 21-го циклов. В дальнейшем появилось несколько модификаций этого метода, но суть их остается неизменной. Что же касается прогноза эпохи максимума следующего 11-летнего цикла, то для этой цели чаще всего используют соотношение Вальдмайера, связывающее десятичный логарифм максимального значения сглаженного среднемесячного относительного числа солнечных пятен с длиной ветви роста цикла, выраженной в годах. Обычно ошибка такого предвычисления не превышает полугода. Кроме метода Оля, для прогноза основных характеристик следующего 11-летнего цикла могут быть использованы и другие методы, которые базируются на параметрах солнечной активности вблизи минимума цикла (средней широте первых высокоширотных групп пятен нового цикла, напряженности полярного магнитного поля Солнца в эпоху минимума, минимальном числе Вольфа и т. п.). Чаще всего они используются как вспомога-

тельные к методу Оля, дающие независимые оценки тех же характеристик 11-летнего цикла, что и этот метод.

Долгосрочные прогнозы солнечной активности, как правило, представляют собой различные варианты обычной линейной экстраполяции. Самыми надежными из них в настоящее время считают предвычисление среднегодовых относительных чисел пятен данного 11-летнего цикла с заблаговременностью*) от нескольких месяцев до трех лет. Наиболее эффективным для этой цели оказывается применение уравнений линейной регрессии, связывающих прогнозируемую величину с соответствующим значением для предшествующего года (или одного из предшествующих лет) отдельно для ветви роста и ветви спада цикла. Средняя ошибка таких прогнозов чисел Вольфа составляет $\pm 12-15$ на ветви роста и $\pm 4-10$ на ветви спада. Если вспомнить, что средняя ошибка определения относительных чисел солнечных пятен достигает 10—15%, такое осуществление прогноза, особенно на ветви спада 11-летнего цикла, можно считать вполне удовлетворительным. Наиболее сложно прогнозирование в самом начале цикла, пока он еще не проявил по-настоящему своего характера. Легче всего предвычислять среднегодовые числа Вольфа на ветви спада. Здесь промахи могут быть обусловлены только сильными флуктуациями. Предвычисление других индексов солнечной активности, помимо чисел Вольфа, кроме суммарной площади солнечных пятен при усреднении за год оказывается невозможным, поскольку самые длинные их ряды охватывают интервал времени не более 30 лет.

Гораздо хуже дело обстоит с прогнозами средней срочности. Здесь тоже применяются линейные уравнения, связывающие прогнозируемую величину с одним или несколькими соответствующими значениями за предшествующие кварталы или месяцы. В лучшем случае такие прогнозы оказываются успешными с заблаговременностью от нескольких дней до полутора месяцев. Но средняя их ошибка гораздо больше, чем в случае предвычисления среднегодовых чисел Вольфа и достигает 25—27%. Зато их можно делать не только

*) Под заблаговременностью обычно понимают интервал времени между моментом выдачи прогнозов и моментом, для которого он составлен.

для индексов солнечных пятен, но и для плотности потока радиоизлучения Солнца в сантиметровом диапазоне длин волн. Самая большая преграда для успешных прогнозов средней срочности — это сильные флуктуации солнечной активности. Их удастся предугадать только в тех случаях, когда они устойчиво появляются в определенные годы ветви роста и особенно ветви спада 11-летнего цикла. Но это малое утешение. В последнее время выяснилось, что немалую помощь в повышении точности таких прогнозов может оказать переход от земных (месяц, квартал) к солнечным (кэррингтоновский оборот Солнца и интервалы, кратные ему) интервалам усреднения индексов солнечной активности. Это уменьшает среднюю ошибку предвычислений подобного рода примерно в полтора раза. Однако такой прием еще только начинают использовать в оперативной практике прогнозирования индексов солнечной активности.

Как уже было сказано, краткосрочные прогнозы индексов солнечной активности пока больше существуют в мечтах, чем в реальности. Поэтому отложим разговор о них до грядущих, более счастливых времен. А теперь займемся краткосрочными прогнозами отдельных явлений солнечной активности. Как правило, они сводятся к прогнозам солнечных вспышек, причем чаще всего сильных или даже протонных, и связанных с ними других явлений. Обычно такие прогнозы даются для уже существующих активных областей и рассматривается вопрос, в состоянии ли они породить вспышку того или иного балла (или конкретно протонную вспышку) и когда эта вспышка произойдет. Первоначально такие прогнозы с заблаговременностью от одних до трех суток базировались только на наборе целого ряда признаков, определяемых из наблюдений службы Солнца, в частности, конфигурации магнитного поля в исследуемой активной области и ее изменения со временем, предшествующей эволюции флоккула и группы пятен в этой области, предшествующей вспышечной активности, характеристиках радиоизлучения Солнца на различных длинах волн, активизации волокон. В этом смысле прогнозы были в какой-то степени субъективными и качество их сильно зависело от опыта прогнозиста как наблюдателя Солнца. Тем не менее оправдывались эти прогнозы вполне удовлетворительно: в среднем на 70—75%. В последние годы все больше проявляется стремление «объек-

тивизировать» краткосрочное предсказание вспышек и увеличить его заблаговременность. Уже сейчас благодаря применению новейших методов математической статистики наметился прогресс в этом трудном деле. В результате уровень оправдывания прогнозов солнечных вспышек существенно повысился. Кроме того, поэтапное их приложение к различным явлениям солнечной активности, с которыми связано появление вспышек, дало возможность добиться успехов и в увеличении заблаговременности таких прогнозов. К сожалению, пока невозможно заблаговременно предсказать появление новой активной области. Единственный способ для этого предоставляют наблюдения в радиодиапазоне, которые позволяют обнаружить ее за одни-двое суток до того, как ее увидят в видимой области спектра.

Глава 8

СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ СВЯЗИ

1. Общие соображения о солнечно-земных связях

Во введении к этой книге уже было сказано, что солнечная активность оказывает широкое воздействие на процессы, происходящие на нашей планете. До сих пор мы говорили только о Солнце, но было бы логично завершить наш разговор хотя бы кратким описанием того, как солнечная активность воздействует на Землю. Не будучи специалистом в данной области, автор проявил бы непростительную смелость, претендуя на сколько-нибудь полное изложение. К тому же это предмет отдельной книги, и такая книга — «Солнечная активность и Земля» Л. И. Мирошниченко — недавно (1981 г.) была выпущена издательством «Наука». К ней мы отсылаем читателя для детального ознакомления с этим кругом вопросов.

Солнечная активность дает о себе знать на Земле двумя типами излучения: электромагнитным (от гамма-лучей с длиной волны примерно $0,01 \text{ \AA}$ до километровых радиоволн) и корпускулярным (потoki заряженных частиц, имеющие плотность от нескольких до десятков частиц в 1 см^3 с энергиями от сотен до миллионов эВ). На пути к Земле они встречают многочисленные преграды, главными из которых являются магнитные

поля в межпланетном и околоземном пространстве. Это обстоятельство сказывается на них по-разному. Электромагнитное излучение беспрепятственно проникает в верхние слои земной атмосферы, где оно в основном поглощается и преобразуется. Поверхности Земли достигает лишь радиация Солнца в ближнем ультрафиолете и видимой области спектра, интенсивность которой почти не зависит от солнечной активности, и в узком участке радиоспектра (от примерно 1 мм до 30 м), которая очень слаба. Основным объектом приложения воздействия этого типа солнечного излучения являются ионосфера, своеобразное зеркало, отражающее радиоволны к Земле, и нейтральная атмосфера Земли. Что же касается корпускулярного излучения Солнца, то оно испытывает на себе воздействие межпланетного магнитного поля и геомагнитного поля в такой степени, что попадает в земную атмосферу в совершенно неузнаваемом виде. И уже только после этого оно взаимодействует с частицами ионосферы и нейтральной атмосферы Земли. Верхние слои земной атмосферы легко поддаются воздействию солнечной активности, и поэтому иногда характеристики происходящих в них изменений даже используют в качестве косвенных индексов солнечной активности.

Совсем иначе обстоит дело с воздействием солнечной активности на тропосферу, нижнюю часть земной атмосферы, которая определяет климат и погоду на Земле. До сравнительно недавнего времени многие очень авторитетные метеорологи утверждали (да и сейчас некоторые из них остались при этом мнении), что погода на Земле обусловлена чем угодно, только не солнечной активностью. Это явилось своеобразной реакцией на другую крайнюю точку зрения, заключавшуюся в том, что любое нарушение погодных условий в любом месте на Земле может быть вызвано проходящей в это время по диску Солнца активной областью. В качестве главного аргумента против такого воздействия выдвигалась большая инерция земной атмосферы и ее практически полная изолированность от внешних воздействий, тем более таких слабых в энергетическом отношении, как солнечная активность. Кроме того, отмечалась неустойчивость обнаруженных статистических связей, а иногда даже полное их отсутствие. Тем не менее детальный анализ проблемы Солнце — тропосфера

привел к заключению, что солнечная активность определенно воздействует и на нижнюю часть атмосферы нашей планеты. Только оно сказывается лишь в неустойчивых областях.

Еще более трудным для решения выглядит вопрос о воздействии солнечной активности на биосферу Земли. Если в проблеме Солнце — тропосфера ни один из предложенных физических механизмов пока не получил всеобщего признания, то здесь вообще дело к настоящему времени не продвинулось дальше обнаружения статистических связей между характеристиками солнечной активности и деятельностью живых организмов, в том числе человека, и некоторых соображений о возможной физической природе такого воздействия. К тому же и такие исследования сильно затруднены созидательной деятельностью человека, которая нередко приводит к уменьшению или полному исчезновению ранее отмечавшихся нежелательных процессов (например, некоторых видов инфекционных заболеваний). Тем не менее в последние годы все больше исследователей склоняется к мнению, что воздействие солнечной активности на биосферу Земли определенно существует, причем оно бывает как непосредственным, так и связанным с изменениями погоды и климата.

Наконец, иногда говорят даже о возможных изменениях особенностей строения земной коры (землетрясения и т. п.) или внутреннего строения Земли (движение земных полюсов) в зависимости от уровня солнечной активности. Но эта возможность еще более проблематична, хотя было бы преждевременно отвергать ее только на этом основании.

Именно в порядке данного здесь перечисления и будут рассмотрены в следующих разделах этой главы вопросы воздействия солнечной активности на различные оболочки нашей планеты.

2. Солнечная активность и верхняя атмосфера

Начнем с влияния на верхнюю атмосферу Земли электромагнитного излучения Солнца. Как уже говорилось, оно оказывает воздействие главным образом на земную ионосферу, т. е. часть верхней атмосферы от высоты 50—70 км до нескольких тысяч километров, в которой имеется достаточное количество ионов и

электронов, чтобы изменить распространение электромагнитной волны. Ионизация нейтральных частиц атмосферы вызывается солнечным излучением и поэтому плотность электронов в ней изменяется в зависимости от высоты Солнца над горизонтом, уровня солнечной активности и фазы ее 11-летнего цикла, а также от времени суток и сезона года. Обычно атмосферу делят на четыре области: D, E, F₁ и F₂. Область D расположена на высоте 50—90 км и отличается невысокой электронной плотностью и значительным поглощением радиоволн. Ионизация ее обусловлена прежде всего солнечным излучением в линии 1216 Å. Область E характеризуется высотами 85—140 км и высокой электронной плотностью ($5 \cdot 10^3$ — 10^4 см⁻³ ночью и $1 \cdot 10^5$ — $4 \cdot 10^5$ см⁻³ днем). Ее ионизация вызывается в основном рентгеновским излучением в интервале длин волн 8—104 Å. Области F₁ и F₂ расположены соответственно на высотах 140—230 км и 200—600 км. Плотность электронов в области F₁ летом равна $2 \cdot 10^5$ см⁻³, а зимой — $4 \cdot 10^5$ см⁻³ и в области F₂ — $2 \cdot 10^5$ и $2 \cdot 10^6$ см⁻³. Основным источником ионизации в этих областях является солнечное ультрафиолетовое излучение в интервале длин волн 300—910 Å. Заметим, что в полярных районах ионосфера подвержена также воздействию корпускулярных потоков, идущих вдоль геомагнитных силовых линий из магнитосферы Земли. Как вы уже могли заметить, высоты областей ионосферы, как и величина плотности электронов в них, испытывают колебания с течением времени.

Поскольку электронная плотность в областях E, F₁ и особенно F₂ сильно зависит от уровня солнечной активности, выражаемого числами Вольфа или плотностью потока радиоизлучения Солнца на волне 10,7 см, увеличиваясь от минимума к максимуму 11-летнего солнечного цикла соответственно в 1,5—2 раза и 2,5—4 раза, изменяются условия радиосвязи, особенно на коротких и очень длинных волнах. А это имеет практическую важность для всех специалистов, нуждающихся в устойчивой радиосвязи. Учитывая, что увеличение электронной плотности в поглощающем слое приводит к увеличению в нем поглощения, в эпоху максимума 11-летнего цикла солнечной активности целесообразно в коротковолновом диапазоне радиоволн переходить на более короткие волны, а в эпоху минимума цикла — на

более длинные. В то же время, в годы максимума 11-летних циклов должна значительно улучшаться радиосвязь на самых длинных волнах (больше 10 000 м), распространяющихся путем отражения от нижней границы области E, поскольку с повышением плотности электронов в ней в это время улучшаются и ее отражательные свойства.

Но помимо постепенных изменений условий радиосвязи, обусловленных ходом 11-летнего цикла солнечной активности, нередко мы сталкиваемся с еще одним (гораздо более неприятным) эффектом воздействия на верхнюю атмосферу электромагнитного излучения Солнца — внезапным затуханием радиосигнала при коротковолновой радиосвязи. Теперь его обычно называют внезапным ионосферным возмущением, до недавнего времени оно было также известно под названием эффекта Деллинджера. Начальная фаза этого явления длится в среднем несколько минут, а общая его длительность составляет около часа. Внезапные ионосферные возмущения вызываются повышенной ионизацией области D ионосферы, виновником которой служит приход рентгеновского излучения с длиной волны меньше 10 Å от солнечных вспышек. Повышение ионизации в этом случае влияет также на распространение длинных и очень длинных радиоволн, а также приводит к усилению отражения длинных радиоволн, создаваемых в земной атмосфере грозами (так называемых свистящих атмосфериков).

Гораздо сложнее дело обстоит с воздействием на верхнюю атмосферу корпускулярного излучения Солнца. Прежде всего следует отдавать себе отчет в том, что понятие это, в сущности, сборное, объединенное лишь тем, что речь в нем идет о потоках солнечных частиц. Оно включает в себя по крайней мере три составляющие. Во-первых, это потоки заряженных частиц солнечного ветра. Они обладают сравнительно низкими энергиями (500—2000 эВ для протонов и 0,3—1 эВ для электронов) и умеренной скоростью (300—600 км/с). Во-вторых, это потоки заряженных частиц из активных областей Солнца, в частности, солнечных вспышек. Энергии протонов сильных вспышек могут достигать 20 кэВ, а электронов — 10 эВ, скорости — 3000 км/с. Что же касается частиц протонных вспышек, то они обладают энергиями 10—1000 МэВ и скоростями от

10 000 км/с до величин, близких к скорости света. Плотность частиц в таких потоках достигает нескольких сотен в 1 см^3 , т. е. примерно на порядок выше, чем в солнечном ветре. Наконец, в-третьих, это потоки заряженных частиц из рекуррентных униполярных магнитных областей, связанных с корональными дырами. Им присущи энергии 5000 эВ для протонов и несколько эВ для электронов при скорости около 1000 км/с и плотности порядка нескольких десятков частиц в 1 см^3 .

Необходимо подчеркнуть, что только протоны энергий, характерных для протонных вспышек, в состоянии проникать глубоко в земную атмосферу; что же касается остальных составляющих корпускулярного излучения Солнца, то они недостаточно энергичны, чтобы не быть задержанными магнитным полем Земли, и только после ускорения до необходимых энергий могут попасть в верхние слои земной атмосферы.

Приближаясь к Земле со сверхзвуковой скоростью, поток солнечных частиц, обладающий высокой электропроводностью, вступает во взаимодействие с геомагнитным полем. При этом в нем возникает система индуцированных электрических токов, магнитное поле которых сильно искажает геомагнитное поле. Оно уничтожает магнитное поле Земли внутри потока солнечного ветра и усиливает геомагнитное поле перед фронтом этого потока. В результате в потоке образуется полость, внутри которой расположена Земля со своим магнитным полем. Эту полость называют магнитосферой.

Обращенная к Солнцу граница магнитосферы находится в среднем на расстоянии 10—12 радиусов Земли. При обтекании геомагнитного поля солнечным ветром возникает устойчивая ударная волна, т. е. граница, отделяющая области пространства с существенно различными характеристиками плазмы и магнитного поля. На некотором расстоянии перед ней расположена магнитопауза, которая служит границей магнитосферы и имеет толщину 100—200 км. Между ударной волной и магнитопаузой образуется переходная область, отличающаяся турбулентным состоянием вещества и неправильными колебаниями магнитного поля. Магнитогидродинамическое взаимодействие солнечного ветра с геомагнитным полем «сдувает» часть силовых линий с дневной стороны (обращенной к Солнцу) на ночную и тем самым приво-

дит к образованию хвоста магнитосферы, или геомагнитного хвоста, который можно проследить до 1000 радиусов Земли. Силовые линии этого хвоста по обе стороны от геомагнитного экватора имеют противоположное направление. Около экватора они находятся так близко друг к другу, что могут соединяться, создавая вблизи геомагнитного экватора нейтральный слой, напряженность магнитного поля в котором близка к нулю, а направление перпендикулярно к плоскости геомагнитного экватора. На дневной стороне северной и южной полярных шапок Земли образуются замкнутые воронкообразные области, которые получили название дневных полярных каспов. Они отделяют замкнутые силовые линии на дневной стороне магнитосферы от разомкнутых, уходящих в ее хвост.

Именно процессы, происходящие в нейтральном слое хвоста магнитосферы, определяют возникновение целой группы явлений, называемых авроральными, которые разыгрываются в двух овальных зонах вблизи северного и южного геомагнитных полюсов, так называемых авроральных овалах. Это полярные магнитные бури, или суббури, полярные сияния, ионосферные возмущения. Суббури представляют собой геомагнитные возмущения длительностью 1—2 часа, возникающие около полуночи по местному времени и проявляющиеся в бухтообразном падении горизонтальной составляющей геомагнитного поля, на которые накладываются беспорядочные флуктуации поля. Полярные сияния видны в высокоширотных районах Земли и представляют собой изумительное зрелище. Иногда вблизи максимума наиболее мощных 11-летних циклов их наблюдают и на средних широтах. Вид полярных сияний весьма разнообразен, но в общем он сводится к четырем классам: спокойным однородным дугам или полосам, лучам, пятнам или поверхностям без определенной формы и вуали, однородному свечению, покрывающему большие участки небосвода. В начале этого раздела мы уже говорили о внезапных ионосферных возмущениях, обусловленных электромагнитным излучением Солнца. Магнитосферные возмущения также приводят к ионосферным возмущениям в высокоширотных районах, которые проявляются в полном прекращении радиосвязи на коротких волнах в ночное время в результате вторжения потоков частиц из хвоста магнитосферы.

Все авроральные явления возникают в результате грандиозного процесса (магнитосферного возмущения), развивающегося в магнитосфере при вторжении высокоскоростного потока частиц солнечного ветра или в замороженного в его плазму магнитного поля, которое имеет составляющую, направленную к югу. При этом пересоединенные силовые линии геомагнитного поля «сносятся» в хвост магнитосферы и там сближаются, что приводит к возрастанию в нем напряженности магнитного поля и, следовательно, к возникновению неустойчивости этого поля. В хвосте происходит бурное пересоединение противоположно направленных силовых линий и перемещение их в сторону Земли. Они увлекают за собой плазму, заполняющую плазменный слой геомагнитного хвоста. Заряженные частицы устремляются вдоль границы между замкнутыми и разомкнутыми силовыми линиями и приходят в авроральные овалы. Перемещаясь из области слабого магнитного поля в хвосте в область сильного вблизи замкнутой магнитосферы, частицы ускоряются. Частицы, получившие наибольшее ускорение, прорываются в замкнутую магнитосферу и образуют там кольцевой электрический ток, вызывающий ослабление геомагнитного поля во время главной фазы магнитной бури. В авроральных овалах эти частицы увеличивают ионизацию ионосферы. Это ведет к поглощению радиоволн в нижних слоях ионосферы и существенному повышению проводимости ионосферы. В результате появляются ионосферные электрические токи, магнитные поля которых регистрируются на земной поверхности. Так возникают возмущения в нижних слоях ионосферы и магнитные бури. Наконец авроральные частицы сталкиваются с атомами и молекулами воздуха, возбуждая их свечение, т. е. полярные сияния.

Сходные более слабые явления возникают и на дневной стороне авроральных овалов. Они связаны с вторжением в ионосферу менее энергичных заряженных частиц через дневные полярные каспы.

До сих пор мы говорили только о полярных магнитных бурях. Между тем магнитная буря обычно наблюдается одновременно на всей Земле, хотя проявления ее в разных местах земной поверхности могут быть неодинаковыми. Особенно простой характер она имеет на низких и средних широтах. Там во время магнитной бу-

ри происходит более или менее внезапное падение горизонтальной составляющей геомагнитного поля, которое длится несколько десятков минут. Это главная фаза магнитной бури, за которой следует стадия медленного восстановления геомагнитного поля до нормы, охватывающая иногда несколько суток. Во время сильных магнитных бурь может быть несколько падений горизонтальной составляющей поля, причем главная фаза следующей бури накладывается на фазу восстановления предыдущей. Иногда перед падением горизонтальной составляющей геомагнитного поля отмечается кратковременный ее подъем. Такое явление называют внезапным началом магнитной бури. Если на записях геомагнитного поля его выделить невозможно, бурю относят к магнитным бурям с постепенным началом. Такое разделение бурь на два класса становится еще более четким, если отдельно рассматривать сильные магнитные бури (в основном с внезапным началом), обусловленные вспышечными активными областями, и рекуррентные магнитные бури (обычно с постепенным началом), вызываемые корпускулярным излучением корональных дыр, расположенных над униполярными магнитными областями Солнца. В отличие от вспышечных магнитных бурь, рекуррентные повторяются в те же дни 27-дневного солнечного календаря в течение нескольких солнечных оборотов, а иногда даже 10—15 оборотов. Если число первых достигает максимальной величины в эпоху максимума 11-летнего цикла чисел Вольфа, то максимальное число вторых отмечается на его ветви спада, за 2—3 года до эпохи минимума.

Обратимся теперь к воздействию на верхнюю атмосферу Земли наиболее энергичных солнечных частиц — протонов, выбрасываемых из Солнца во время протонных вспышек. Эти частицы вызывают возмущения ионосферы, особенно опасные для коротковолновой связи на самых высоких широтах. Это так называемые поглощения в полярной шапке. Обычно такое возмущение начинается в среднем через несколько часов после сильной солнечной вспышки, его максимум наблюдается через 1—2 суток после его начала, а восстановление может продолжаться около 10 суток. Поскольку протоны таких сильных вспышек беспрепятственно проникают в области D ионосферы, где частота соударений частиц велика, и поглощаются в ней, они вызывают особенно боль-

шое поглощение радиоволн именно в этой области. В результате уменьшается интенсивность радиоволн и повышается температура верхней атмосферы. Поглощение в полярной шапке, как правило, приводит к полному прекращению радиосвязи на коротких волнах на несколько суток над Северным Ледовитым океаном и над Антарктидой. Особенно большое число возмущений этого типа отмечают в эпоху максимума 11-летнего цикла или вскоре после него.

Наш рассказ о влиянии солнечной активности на верхнюю атмосферу Земли останется незавершенным, если не сделать из него соответствующих практических выводов. Читатель мог убедиться, что опасности, которые нас ждут в результате этого воздействия, таковы, что они со всей остротой ставят вопрос об особой важности прогнозов солнечной активности для обеспечения устойчивой радиосвязи и безопасной навигации. Такие прогнозы позволили бы успешно прогнозировать нарушения радиосвязи, подготовить обходные радиотрассы, перейти на более выгодные длины волн.

3. Солнечная активность и тропосфера

Если воздействие солнечной активности на верхние слои земной атмосферы выявляется вполне четко, то в нижней атмосфере Земли (тропосфере) оно становится гораздо труднее уловимым. Скорее всего, причина этого лежит в том обстоятельстве, что солнечная активность непосредственно воздействует на процессы в тропосфере только в сравнительно редких случаях, когда солнечные протоны высоких энергий проникают в глубь земной атмосферы. В общем же ее воздействие осуществляется через верхнюю атмосферу, поскольку тропосфера «привыкла» к установившимся в ней условиям и требуются большие усилия, чтобы нарушить их. К тому же достигаемый при этом эффект оказывается гораздо скромнее, чем тот, с которым мы сталкиваемся в верхней атмосфере Земли. Более того, даже те возмущения, которые возникают под действием солнечной активности, в особенности корпускулярного излучения Солнца, в разных районах Земли имеют противоположный знак и характер их изменяется со временем и сезоном года. Поэтому здесь мы не будем говорить о том, как именно происходит изменение той или иной характеристики тропосферы

в результате влияния солнечной активности, а ограничимся лишь указанием, что оно действительно существует. Так или иначе, уже накоплен богатый материал, который свидетельствует о реальности воздействия активности Солнца на нижнюю атмосферу Земли.

Определяющее воздействие солнечная активность оказывает на общую циркуляцию в тропосфере. Это влияние выражается в изменении интенсивности, а через нее и типа атмосферной циркуляции, в зависимости от фазы различных циклов. В частности, такие изменения особенно усиливаются в эпоху максимумов 11-летних циклов и в наиболее высоких 11-летних циклах. Пожалуй, одним из наиболее надежно установленных фактов в проблеме Солнце — Земля является углубление циклонов и усиление антициклонов под действием солнечной активности; этот факт еще с 30-х годов хорошо известен метеорологам под названием закона акцентации. Правда, в отдельные периоды времени закон действует только частично или вовсе не проявляется. Изменения уровня солнечной активности приводят к изменению величин основных метеорологических элементов: температуры, давления, числа гроз, осадков и связанных с ними гидрологических и дендрологических характеристик: уровня озер и рек, грунтовых вод, солености и оледенении океана, числа колец в деревьях, иловых отложений и т. п. Особенно устойчивы такие изменения в определенных районах Земли. Важным является то обстоятельство, что как показало сравнение реакции тропосферы на магнитные бури различного типа, корпускулярное излучение вспышек и корональных дыр во многих случаях оказывает противоположное воздействие на нижнюю атмосферу Земли.

При исследовании изменений климата в некоторых районах земного шара были обнаружены 11-летние циклы в температуре воздуха, атмосферном давлении, осадках. Однако в других его областях гораздо лучше проявляется 22-летний цикл, также имеющий солнечное происхождение. Например, если засухи в районе Казахстана связаны с 11-летним циклом солнечной активности, то в Северной Америке — с 22-летним циклом. 22-летний цикл в тропосферных процессах может объясняться их зависимостью от сильных рекуррентных магнитных возмущений, наблюдающихся на ветви спада четных 11-летних циклов или связью с сильными

вспышечными возмущениями, особенно характерными вблизи максимума нечетных циклов. Поэтому отсутствие в каком-либо из тропосферных процессов 11-летней цикличности отнюдь еще не означает отсутствия связи с солнечной активностью вообще, как иногда утверждают. В некоторых районах Земли лучше всего проявляется 5—6-летний цикл, который особенно заметен в индексах магнитной возмущенности. Этот цикл наиболее характерен для тропосферных явлений, возникающих при высоком уровне геомагнитной возмущенности. Наложение 11-летнего и 22-летнего циклов было найдено, в частности, в распределении атмосферного давления по земной поверхности. Особенно отчетливо в изменении климата нашей планеты проявляется 80—90-летний цикл. И хотя ряды метеорологических параметров охватывают сравнительно короткие интервалы времени даже по сравнению с регулярными наблюдениями солнечных пятен, тем не менее этот цикл хорошо виден в изменении гидрологических и особенно дендрологических характеристик. В частности, нарушение закона акцентации чаще всего происходит именно на определенных фазах 80—90-летнего цикла. Сейчас нередко говорят и о более долговременных изменениях климата, связанных с солнечной активностью. Однако проверка подобного рода заключений встречается с большими трудностями, поскольку привлекаемые косвенные ее показатели (например, концентрация радиоуглерода) связаны как с солнечными, так и с земными процессами, а данные о нашей планете тоже нуждаются в критическом анализе.

Влияние солнечной активности на тропосферу четко выступает при составлении солнечных календарей, о которых мы уже говорили в связи с активными долготами (см. главу 5), явлений в нижней атмосфере Земли, особенно на ветви спада 11-летнего цикла. Любопытно, что активные долготы в тропосфере выявляются даже более отчетливо, чем на Солнце. Использование солнечных календарей может служить хорошим подспорьем в прогнозах погоды, которые учитывают солнечную активность. Не менее важным для той же цели оказалось изучение связи сильных флуктуаций солнечной активности с аномалиями погоды в определенных земных регионах, которое дало ряд эмпирических правил.

Следует отметить, что электромагнитное излучение Солнца также находит свое отражение в нижней атмо-

сфере Земли, особенно на средних и низких широтах. Возможно, это свидетельствует в пользу определяющего воздействия на процессы в тропосфере изменений в озоносфере, располагающейся на высоте примерно 20—60 км, в которой происходит образование и разложение озона под влиянием электромагнитной солнечной радиации. Это один из мыслимых механизмов воздействия солнечной активности на нижнюю земную атмосферу. Было бы излишним рассматривать здесь различные предложенные механизмы такого воздействия, тем более, что ни один из них к настоящему времени не подвергся детальной проверке и не был признан всеобъемлющим. Работа в этом направлении продолжается, и можно надеяться, что она убедит в конечном итоге ныне сомневающихся в том, что нижняя атмосфера Земли тоже отнюдь не безразлична к тому, как «ведет себя» Солнце.

4. Солнечная активность и биосфера

Проблема Солнце — биосфера в настоящее время находится еще в стадии становления, и хотя она все больше и больше привлекает к себе внимание, скептиков по отношению к реальности влияния солнечной активности на биосферу, особенно среди медиков и биологов, пока не меньше, чем сторонников этой точки зрения. Помимо тех же доводов, которые приводились противниками проблемы Солнце — тропосфера, скептики обычно говорят о способности живого организма, в частности, человеческого, приспосабливаться к изменениям внешних условий. Это действительно характерно для совершенно здорового организма. Однако нельзя отрицать и отсутствия или по крайней мере сильного ослабления этого свойства у больных людей. Кроме того, необходимо учитывать, что внешние условия тоже нередко изменяются под влиянием солнечной активности, как можно было убедиться из чтения предыдущего раздела этой главы.

Солнечная активность оказывает воздействие на биосферу как через метеорологические условия, так и прямо, хотя в последнем случае это влияние, скорее всего, осуществляется через магнитосферу Земли.

Первая группа таких воздействий характеризуется проявлением солнечных циклов, в особенности 11-летних, в численности насекомых и многих животных. Посколь-

ку в ряде случаев животные являются носителями инфекции, неудивительно, что солнечная цикличность обнаруживается и в эпидемических заболеваниях. Следует заметить, что за последние десятилетия медиками было сделано очень много для ликвидации таких болезней, в результате чего «естественная» картина эпидемий была нарушена. Тем не менее, даже сейчас нередко обнаруживаются воздействия солнечной активности подобного рода. Конечно, на самом деле картина может быть гораздо сложнее: эпидемические заболевания, возможно, обусловлены не только действием, оказываемым Солнцем через тропосферу, но и прямым влиянием его активности на биосферу. Однако сейчас еще рано делать в этом отношении какие-либо категорические выводы.

Вторая группа солнечно-биосферных связей (прямых) в первую очередь касается человеческого организма. Медики обратили внимание на то обстоятельство, что число внезапных смертей и случаев обострения заболеваний сердечно-сосудистой системы, тесно связано с солнечной активностью и обусловленной ею геомагнитной возмущенностью. Выяснилось, что особенно сильно этот эффект проявляется при резких изменениях уровня активности Солнца. Хотя в данном случае метеорологические факторы и играют некоторую роль, тем не менее, они явно не являются определяющими. В связи с этой проблемой очень интересно, что коллоидные системы, обычно находящиеся в состоянии неустойчивого равновесия, определенно подвержены влиянию вариаций геомагнитного поля. Поскольку кровь и даже почти весь живой организм с физико-химической точки зрения могут рассматриваться как коллоидная система, воздействие солнечной активности на организмы с нарушением функций сердечно-сосудистой системы получает дополнительное подтверждение.

Независимые свидетельства связи сердечно-сосудистых заболеваний с солнечной активностью были получены в результате изучения свойств крови: числа лейкоцитов, скорости свертывания и др. Важным доказательством солнечной обусловленности этих процессов служит то обстоятельство, что они одинаково проявляются в разных районах Земли. Особенно отчетливо солнечная активность сказывается на состоянии нервной системы. И хотя исследований такого воздействия гораздо меньше, чем влияния на сердечно-сосудистые за-

болевания, тем не менее они оказываются очень впечатляющими. Особенно ярко выражена связь между количеством дорожных происшествий, которые сильно зависят от скорости реакции водителей, и солнечной активностью. В последние годы появились указания на то, что активность Солнца сказывается на творческой деятельности людей.

Пока еще рано говорить о причинах воздействия солнечной активности на биосферу, хотя таковыми могут служить вариации магнитного поля, радиоизлучение на определенных частотах и ультразвук, которые могут действовать в резонансе с живым, в частности, человеческим организмом. Однако даже сами результаты, полученные к настоящему времени, безотносительно к попыткам их объяснения, показывают, что проблема воздействия солнечной активности на биосферу Земли заслуживает самого пристального внимания и в конечном итоге получит положительное решение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой книге сделана попытка осветить основные проблемы солнечной цикличности. Насколько ясно и полно удалось это сделать, судить читателю. Но, как, вероятно, он сам уже заметил, здесь рассказано о вопросах, которые ждут своего решения, не меньше, чем о вопросах решенных. Остается сказать несколько слов о проблемах, которые либо еще должны быть поставлены, либо поставлены только недавно и поэтому о них пока еще рано было говорить. Естественно, отбор таких проблем отражает интересы автора и никоим образом не претендует на то, чтобы считать его исчерпывающим.

Прежде всего несколько замечаний о службе Солнца. Как можно было убедиться, прочитав эту книгу, существует разительный контраст между данными, которые приносит нам теория солнечных циклов, с одной стороны, и служба Солнца, с другой. Первая дает долготно-широтное распределение составляющих крупномасштабного магнитного поля, вторая — соответствующее распределение активных образований. Более того, все, что мы знаем о солнечной активности, сводится к информации об активных образованиях. Но все эти образования занимают столь малую долю площади солнечной атмо-

сферы на любом ее уровне, что напрашивается вывод о крайней скудости наших знаний о солнечной активности, поскольку большая часть атмосферы оказывается для нас занятой своеобразными «белыми пятнами». Совершенно иная картина предстала бы перед нами, если бы мы имели дело не с нынешними синоптическими картами различных слоев солнечной атмосферы, а с картами полей ее физических характеристик, прежде всего магнитного поля и поля скоростей. В настоящее время имеются только карты крупномасштабных фотосферных магнитных полей. Карт для скоростей регулярно не получают нигде. Что же касается карт поля яркости, то над способами регулярного получения его даже не задумывались, считая, по-видимому, что его с успехом могут заменить фотоснимки соответствующих слоев солнечной атмосферы. Конечно, сейчас еще трудно судить о реальной возможности составления на основе спектроскопических наблюдений в достаточно короткие сроки карт полей температуры и давления. Но и такой вопрос в принципе заслуживает внимания. Замена нынешних синоптических карт Солнца картами полей его различных физических характеристик позволила бы перейти от прогнозов современных индексов солнечной активности (понимание физического смысла которых крайне затруднительно), к физическим параметрам, и тем самым значительно облегчила бы переход от эмпирико-статистических методов прогноза солнечной активности к физическим его методам.

Другой важной проблемой является соотношение между изучением крупномасштабной и мелкомасштабной (тонкой) структур солнечной активности. Было время, когда все исследования Солнца сосредоточивались вокруг крупномасштабных структур. Их результаты составили остов наших современных представлений о солнечной цикличности. Но к остову нужны и стены. Глубокое изучение ранее открытых явлений солнечной активности дало сведения о их тонкой структуре, которые далеко не всегда служили дополнением или уточнением к тому, что уже было известно, а нередко противоречили ему. Так появилась своеобразная «китайская стена» между исследованиями крупномасштабной и мелкомасштабной структуры атмосферы. Сторонники каждого из этих направлений утверждали, что только их метод исследования может служить ключом к реше-

нию проблемы солнечной активности. В последние годы особенно решительными были исследователи тонкой структуры, которые действительно получили настолько впечатляющие результаты, что заявили: только тонкая структура солнечной атмосферы может раскрыть сущность солнечной активности. Иногда к этому даже добавлялось, что крупномасштабные структуры — вообще фикция, плод усреднения и не более того. Возникает дилемма, насколько правы те и другие и каково соотношение между этими двумя направлениями изучения солнечной активности. Вероятно, путь к раскрытию загадки солнечной цикличности лежит только через их взаимное проникновение. Свидетельством этого служит хотя бы первичная структура солнечных магнитных полей, обнаруженная в последние годы, которая относится к мелкому масштабу и вместе с тем позволяет судить о крупномасштабных образованиях. Это никоим образом не взаимное дополнение структур, а именно их взаимопроникновение. Более того, насколько можно судить по данным наблюдений, которыми мы располагаем к настоящему времени, солнечная активность представляет собой взаимодействие структур самых различных временных и пространственных масштабов. Поэтому возникает необходимость их одновременного и многостороннего изучения.

Все явления солнечной активности в самом грубом приближении, как мы знаем, обычно делят на долгоживущие и короткоживущие (или стационарные и нестационарные). Естественно поставить вопрос, существует ли реальная граница между этими двумя типами активных образований и если существует, то где она проходит в пространстве и во времени. Из наблюдений протуберанцев известно, что они могут активизироваться, превращаясь из спокойных в активные и даже эруптивные. Существуют ли подобные превращения у других активных образований? Пока об этом мы почти ничего не знаем, если не считать некоторых данных о тонкой структуре этих явлений. Если только такие превращения окажутся возможными для любого явления солнечной активности, возникает вопрос, что приводит к превращению стационарного образования в нестационарное, а быть может, и наоборот. Пока нам известно лишь, что многие из активных образований, такие, как факельные площадки или группы солнечных пятен, обладают

внутренней нестационарностью и между тем оказываются наиболее устойчивыми.

Нам известно, что магнитные поля играют важную, если не решающую роль в солнечной цикличности. Долгое время исследователи Солнца обсуждали вопрос о том, существует ли общее магнитное поле и какова его структура. Был период, когда его существование вообще отрицалось. Затем стали говорить, что хотя оно и имеется, но строение его столь сложно и запутанно и оно столь слабое, что обнаружить его практически невозможно. Потом решили, что это так называемые фоновые крупномасштабные магнитные поля в солнечной фотосфере. Теперь появились сомнения в реальности таких полей, хотя их и продолжают искать. Иногда утверждают, что истинное общее магнитное поле Солнца спрятано столь глубоко, что оно и не проявляет себя в солнечной атмосфере. Что же касается слабых крупномасштабных полей в солнечной фотосфере, то они являются продуктом его преобразования и усиления под действием дифференциального вращения Солнца. Возможно, разобраться в этом вопросе поможет решение проблемы, существует ли реальное обращение знака магнитного поля в полярных областях Солнца. Если добавить к уже сказанному, что мы все еще не умеем надежно измерять магнитные поля в верхних слоях солнечной атмосферы, становится очевидным, что решение вопроса о структуре магнитного поля, и его общего магнитного поля в частности, по-прежнему остается ключевой проблемой солнечной цикличности.

Не менее важной является проблема соотношения активных долгот с секторной структурой магнитных полей на Солнце и в межпланетном пространстве. Пока решение ее сильно затруднено, в частности, чисто инструментальными ограничениями. Но имеются и другие трудности. Дело в том, что пока мы очень плохо знаем динамику активных долгот. То, что сделано в этом направлении, представляется скорее первыми штрихами к картине, чем настоящим, даже предварительным решением задачи. Так, нуждаются в усовершенствовании сами методы выделения активных долгот, особенно в части их статистического обоснования. Конечно, такая проблема потребует не только значительных усилий, но и времени для накопления достаточного материала о магнитных полях. И тем не менее, без нее не обойтись

в разработке теории солнечной цикличности. Тесно связан с этой проблемой вопрос о характере вращения Солнца и возможного его изменения со временем. В настоящее время, когда в основном для его рассмотрения используются только данные о солнечных трассерах, таких как солнечные пятна, невозможно отделить параметры вращения от крупномасштабных движений в солнечной атмосфере. А между тем это очень важно для теории. И снова приходится уповать на спектроскопические наблюдения, которых пока очень мало.

И, наконец, пора уже нам выбраться за пределы Солнца и перекинуть мостик к другим звездам. Известно, что магнитное поле и его переменность присущи звездам более горячим и гораздо быстрее вращающимся, чем наше дневное светило. Вполне вероятно, что дело здесь в том, что из-за удаленности от нас звезд мы не в состоянии измерить их магнитные поля, если они столь же слабые, как среднее поле Солнца. Возможно, именно такими полями и обладают звезды, подобные Солнцу. Но есть иной путь для того, чтобы исследовать такие звезды в отношении их возможной переменности, в частности, и магнитной. Нужно регулярно наблюдать вариации их свечения в линиях ионизованного кальция. Как показали первые, еще очень малочисленные исследования в этом направлении, можно ожидать, что такие наблюдения позволят по-новому взглянуть на проблему солнечной активности (как на особый тип звездной переменности) и на проблему звездной переменности в целом.

Таков, так сказать, традиционный подход к решению проблемы солнечной активности. В какой-то мере он сходен с нашим подходом к изучению природы вообще. Действительно, мы, в сущности, привыкли судить обо всех естественных явлениях с помощью опытов, производимых на нашей планете. Только сравнительно недавно, после того как первые космические ракеты, искусственные спутники Земли и космические аппараты вышли за пределы земной атмосферы, впервые удалось взглянуть на Землю не изнутри, а снаружи. В результате для нас открылся в буквальном смысле этого слова целый новый мир.

Не находимся ли мы в таком же положении, как это было до прорыва человека в космос с нашими познаниями о Земле и окружающем нас мире, и в отношении

Солнца? Да, оно дает нам неизмеримо больше сведений, чем любая звезда, которую мы имеем возможность наблюдать во Вселенной. Но вместе с тем оно и ограничивает нас не только в смысле возможности познания других небесных объектов, если характерные для них физические условия резко отличаются от «солнечных». При всем многообразии процессов, которые удается наблюдать на Солнце, все они присущи одной звезде определенного возраста, определенной стадии эволюции, определенного строения. Таким образом, в попытках проникнуть в природу солнечной активности не выходя за пределы Солнца (или даже Солнечной системы), мы тем самым ограничиваем себя нисколько ни меньше, чем делали это раньше в отношении планеты, на которой мы живем. Поистине трудно найти что-либо более обманчивое, чем то, что находится у тебя как бы «под рукой».

И вот, подобно тому как с некоторых пор на наше дневное светило перестали смотреть как на эталон типичных спокойных звезд и начали рассматривать его активность как проявление всеобщей звездной переменности, вполне резонно было бы взглянуть на солнечную активность во всеоружии данных наблюдений о звездной переменности в целом. Конечно, сведения о каждой звезде или звездной системе в силу ее удаленности от нас гораздо беднее наших нынешних знаний о Солнце, но зато весь звездный мир отличается существенно бóльшим богатством «оттенков» свойств его различных объектов, чем мир Солнца. Ведь различные звезды обладают разным возрастом, разными толщинами их конвективных зон, разным вращением и магнитным полем, разным строением их атмосфер и еще многими различными физическими свойствами, в частности, различным уровнем переменности. Вот почему развитие астрономической техники и значительное расширение наших знаний о Вселенной за последние годы заставило исследователей Солнца по-настоящему почувствовать не только свою силу, но и слабость. Они поняли, что отнюдь не стали монополистами даже в знании и понимании одной исследуемой ими звезды и тем более в овладении ключом к природе звездной переменности. И тогда они повернулись лицом к звездному миру. Вот так и появились новые специальные программы изучения природы солнечной активности с помощью особых программ наблюдений множества различных звезд, в частности, нашей звезды, Солнца.

Первая задача, которая поставлена в программах подобного рода, — это поиски циклов звездной активности и изучение вращения звезд, расположенных на расстоянии не более 25 парсеков от Солнца. С целью выявления звездных циклов намечено проведение в течение 10 лет регулярных наблюдений примерно 500 таких звезд в линиях Н и К ионизованного кальция. Эти наблюдения должны производиться от двух до четырех раз за ночь ежедневно в течение шестимесячного сезона. Для изучения вращения звезд требуется по два измерения в каждую ночь 120-дневного сезона примерно 100—200 звезд, причем около 30 из них могут быть использованы для исследования дифференциального вращения каждый сезон в течение 10 лет. Раньше уже говорилось о причинах, по которым использование линий Н и К для поисков звездных периодов представляется наиболее уместным. Что же касается получения характеристик вращения звезд, то для этого нужны фотометрические и спектроскопические наблюдения, особенно в линии К ионизованного кальция. Они могут быть определены из фотометрических наблюдений движений локализованных активных областей по поверхности звезд, из изучения асимметрии контуров спектральных линий, в особенности линии К, по спектрограммам «запятнанных» звезд и с помощью других специальных методов.

Поскольку для 500 звезд программы известны величины движений и расстояний, нетрудно определить и их возраст. А тогда можно связать период, амплитуду, форму и «зашумленность» выделенных циклов активности звезд с их возрастом и массой. В настоящее время известны циклы активности и у некоторых других звезд. Например, многие субгиганты (звезды, которые излучают в 4—5 раз меньше света, чем соответствующие звезды главной последовательности) отличаются гораздо более высоким уровнем хромосферной активности, чем звезды главной последовательности того же спектрального класса, несмотря на сравнительно большой возраст субгигантов и ослабление хромосферной активности с возрастом у звезд главной последовательности. Известно, что часть субгигантов возникла в результате эволюции звезд главной последовательности ранних спектральных классов с глубокими конвективными зонами, тогда как остальные эволюционировали из звезд главной последовательности, подобных Солнцу. Пока неясно, все ли субгиганты

проявляют циклы хромосферной активности и вообще повышенную хромосферную активность. Это можно будет узнать только из их дополнительных наблюдений. Если окажется, что это так, существующие ныне теории динамо потребуют дополнительного развития.

Как уже отмечалось в гл. 6, динамо-теории солнечных циклов опираются на взаимодействие между движениями в конвективной зоне и дифференциальным вращением Солнца. Таким же образом в настоящее время объясняют и циклы активности других звезд. Глубина конвективной зоны звезды определяется в основном ее температурой, возрастом и химическим составом. Глубину конвективной зоны можно установить косвенно, зная величину истощения легких элементов (лития и бериллия), а также периоды пульсации на поверхности звезды. Вращение (в частности, дифференциальное) связано с температурой звезды, ее возрастом и другими (пока неизвестными) начальными характеристиками. Известно, что глубина конвективной зоны и вращение различным образом зависят от тех же переменных. Поэтому понимание природы активности Солнца и звезд может быть достигнуто только на основе многомерного анализа активности большого ряда звезд по их различным параметрам (температуре, металличности, возрасту и др.).

Есть основания считать, что на существование такой программы при достаточной целеустремленности потребуется примерно 10 лет. Естественно, что необходимо заранее ограничить объем наблюдений звездами классов G и K с определенными значениями скорости вращения, уровня активности, возраста, металличности, температуры. Ранее мы уже говорили о способах определения скорости вращения и выделения звездных циклов активности. Температуру и химический состав звезд можно достаточно точно оценить из спектроскопических наблюдений. С другой стороны, фотометрические наблюдения, в частности, в линии K ионизованного кальция, позволяют получить характеристики возраста и химического состава звезд. В некоторых случаях для уточнения величины массы потребуются дополнительные одиночные измерения лучевых скоростей (составляющей скорости по лучу зрения) спектрально-двойных звезд.

Кроме программ наблюдений, которые характеризуют общие свойства активности звезд, в частности, Солнца, необходимы дополнительные программы, которые по-

зволили бы также изучить хотя бы некоторые отдельные стороны явления и их связь со звездными циклами.

Как уже известно из этой книги, солнечные пятна и солнечные вспышки могут наблюдаться на солнечных обсерваториях с достаточно высоким спектральным разрешением. Только иногда их можно заметить при наблюдениях Солнца с широкополосными фильтрами, выделяющими довольно большую область спектра. У многих звезд при таких наблюдениях обнаруживается значительно повышенная активность. Эти наблюдения представляют особый интерес для исследователей Солнца, поскольку они выявляют другие пока еще плохо понимаемые процессы. Остановимся на этом более подробно в связи с предлагаемыми дополнительными программами наблюдений, охватывающими отдельные явления солнечной активности.

Имеется несколько типов небесных объектов, таких как звезды-карлики класса М с линиями излучения, звезды типа Т Тельца и некоторые двойные звезды, у которых заметны импульсные явления, в отдельных случаях сходные с солнечными вспышками, а в других — существенно отличающиеся от них. Изучение таких явлений у вспыхивающих звезд, отличающихся широким разнообразием физических условий, естественно сочетать с исследованием солнечных вспышек. В частности, особенно важны для выявления связи вращения и звездной активности надежно установленные корреляции между показателями вспышечной активности, возрастом звезд, кратностью системы и скоростями вращения. Фотометрическое изучение упомянутых и связанных с ними других небесных объектов может дать новые представления о ранних стадиях эволюции нашего дневного светила и звезд типа Солнца. Для этой цели целесообразнее всего проведение в течение нескольких лет высокоточных фотометрических наблюдений в линиях H_{α} водорода и К ионизованного кальция 20 звезд, проявляющих значительную хромосферную активность. Для более активных и более ярких вспыхивающих звезд применение высокоскоростной спектроскопии с высоким разрешением позволит изучить выделение магнитной энергии, температуру и давление во вспышечном взрыве, а также реакцию атмосферы звезды и звездного окружения на вспышку.

Определенные классы звезд (такие, как ВУ Дракона и BS Гончих Псов), отличающихся быстрым вращением,

по-видимому, покрыты образованиями, аналогичными солнечным пятнам. Только такие образования охватывают значительно бóльшую долю поверхности звезды, чем пятна на Солнце, и отличаются гораздо бóльшей «живучестью». Определение циклов активности, скоростей вращения и дифференциального вращения «запятанных» звезд было бы ценным вкладом в теорию. Здесь необходимы высокоточные фотометрические и спектральные наблюдения в течение нескольких лет.

Как известно, магнитное поле Солнца является основой его активности. Отличаясь очень сложным строением, оно с трудом поддавалось измерению, когда Солнце изучалось как звезда, т. е. в целом. К настоящему времени разработана и испытана новейшая техника измерений слабого магнитного поля, которая позволяет не только находить его напряженность, усредненную по солнечному диску, но и показывать прохождение его секторных границ. Эта техника может быть применена для определения характеристик интегрального магнитного поля множества звезд, в том числе типа Солнца. Уже получены первые результаты таких измерений, которые привели к предварительным выводам исключительной важности. Они показали не только сильную неоднородность хромосферной активности, но и возможную зависимость особенностей магнетизма звезд от их возраста. Если последний вывод подтвердится на большем материале наблюдений, трудно переоценить его значение для проблемы происхождения звездного магнетизма. Во всяком случае это будет означать необходимость коренного изменения нынешних идей о звездных динамо.

Мы уже говорили о существовании на Солнце корональных дыр, которые, по крайней мере частично, являются ответственными за появление высокоскоростных потоков солнечного ветра (см. гл. 2). Известно, что корональные дыры могут быть обнаружены, в частности, из наблюдений в линии гелия $10\,830\text{ \AA}$. Оказалось, что и на других звездах отмечается переменность интенсивности излучения этой линии. Вполне возможно, что она отражает эволюцию звездных корональных дыр. Учитывая, что солнечным корональным дырам присуще почти жесткое вращение, было бы интересно регистрировать звездные корональные дыры как показатель вращения звезд и структуры звездных ветров. Следует обратить внимание также на существование обратной связи между по-

явлением некоторых хромосферных линий излучения и величиной потери массы звезд. Оно свидетельствует о том, что звездные ветры играют решающую роль в общем балансе энергии внешних атмосфер звезд. Учитывая все это, необходимо проведение одновременных наблюдений большого ряда звезд, охватывающих широкую область физических характеристик, вариаций интенсивности линий $10\,830\text{ \AA}$ и К ионизованного кальция, магнитного поля и других показателей звездной активности, для выяснения особенностей изменения структуры звездных атмосфер и звездных ветров в течение цикла их активности. Хотя проведение таких наблюдений линии $10\,830\text{ \AA}$ является очень трудоемкой во многих отношениях задачей, ее решение сулит многообещающие результаты.

В настоящее время, в особенности благодаря наблюдениям в рентгеновских лучах на орбитальных обсерваториях, вполне определенно установлено существование горячих хромосфер и корон у звезд всех спектральных классов и типов светимости. Хромосфера и корона Солнца являются областями магнитогидродинамических процессов, которые накладывают существенный отпечаток на всю структуру солнечной атмосферы. Эти процессы еще плохо изучены. Поэтому только дополнительное детальное исследование Солнца и наблюдение звезд с широким диапазоном физических характеристик могло бы привести к получению в недалеком будущем реальной картины структуры атмосферы нашего дневного светила, без которой невозможно раскрытие природы солнечной активности.

Лишь для Солнца мы имеем возможность непосредственно измерять вариации спектра и площадь активных областей и понять, как они отражаются на переменности интегральных свойств, таких, как излучение в линиях К ионизованного кальция и $10\,830\text{ \AA}$ гелия. Мы знаем также величины скорости вращения Солнца, полного потока солнечного излучения и особенностей полей скоростей солнечной атмосферы. Располагая этими данными, можно калибровать флуктуации, наблюдаемые в спектре других звезд, т. е. точно установить их масштаб. Такая привязка могла бы явиться прочной основой для прогресса наблюдений звезд и продвижения исследований природы солнечной переменности. А для этого необходимо регулярное проведение синоптических измерений солнечного спектра с помощью инструментов, предназначенных для

наблюдений звезд. Поскольку солнечный поток достаточно большой, такие измерения будут отличаться высокой точностью, давая стандарт, по которому можно проверить устойчивость звездных данных. Они не потребуют много времени (достаточно нескольких минут за день), но должны производиться хотя бы ежедневно и без потери точности.

Наконец, особо следует сказать о пульсациях и колебаниях звезд. Эта область исследований за последние годы особенно интенсивно развивалась и даже получила особое наименование солнечной и звездной сейсмологии. Если пульсации (т. е. периодические колебания радиуса) отдельных типов звезд были известны уже давно, то о их существовании у Солнца впервые узнали только несколько лет назад. В то же время пятиминутные колебания, столь характерные для солнечной атмосферы, лишь недавно благодаря развитию новой техники были обнаружены у горячих звезд. Имеются основания надеяться, что в самом ближайшем будущем их удастся найти и у звезд типа Солнца.

Итак, читатель мог убедиться в том, что будущее раскрытия природы солнечной активности зависит от совместных усилий исследователей Солнца и звезд. Будем надеяться, что в конечном итоге этот союз в не слишком далеком будущем приведет к пониманию сущности не только солнечной, но и звездной переменности.